

# **Desenvolvimento do Processo de Vazamento em Coquilhas Rotativas**

**INEGI**

*Flávio Dias Ferreira Marques*

**Relatório do Projecto Final do MIEM**

Orientador na Empresa: Engenheiro Rui Jorge de Lemos Neto

Orientador na FEUP: Engenheira Ana Rosanete Lourenço Reis



**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro de 2010

*Aos meus pais*



## Resumo

Este trabalho tem como principal objectivo realizar o estudo de uma das variantes do processo de vazamento em moldações permanentes, o vazamento em coquilhas rotativas. Para isso foi realizado o estudo teórico deste processo, comparando-o com outros processos de fundição. Após a realização do estudo teórico passou-se à simulação computacional de forma a comparar os resultados teóricos e os realmente obtidos. Foram simulados 3 tipos de puxadores (peças fabricado pela empresa STA – Sociedade Transformadora de Alumínios) utilizando o programa *Experto*, mais tarde uma das peças foi realmente obtida através de dois processos de fundição em moldações permanentes, por coquilha estática e por coquilha rotativa. O objectivo passou então a ser verificar qual dos dois processos era o mais viável para obtenção dos puxadores.



## **Development of the Tilt-Die Casting Process**

### **Abstract**

This work is mainly intended to complete the study of a variant of the process of permanent mold casting, tilt-die casting. For this, the theoretical study of this process was performed, comparing it with other casting processes. After completion of the theoretical study the computer simulation was started in order to compare the theoretical results and the actually achieved. Three handles were simulated (parts manufactured by STA - Society of Aluminum Manufacturing) using the program *Experto*, once the pieces were actually obtained, through two processes of permanent mold casting, gravity and tilt-die casting, the goal then became to verify which of the two cases was the most feasible to obtain the handles.



## **Agradecimentos**

Todo este trabalho é resultado de uma jornada efectuada na unidade de Fundição e Novas Tecnologias (CETECOFF). Gostaria de agradecer ao Engenheiro Rui Neto e à Engenheira Ana Reis pela orientação e apoio académico prestado durante a realização deste estágio.

O meu muito obrigado a todos os que de uma ou de outra forma contribuíram para a realização deste relatório, principalmente ao Engenheiro Paulo Machado pela paciência e tempo dispendido.

A todos os meus amigos e colegas de curso que através das suas críticas contribuíram não só para a produção deste relatório bem como para a minha formação académica.

Á minha família e namorada pelo apoio demonstrado.

Os meus sinceros agradecimentos á Instituição INEGI pela bolsa cedida durante a realização deste estágio.





## Índice de Conteúdos

1	Introdução Geral.....	1
1.1	Introdução .....	1
1.2	Apresentação das Empresas .....	1
1.3	Estrutura do Relatório .....	4
2	Estado da Arte .....	5
2.1	Introdução .....	5
2.2	Fundição em Coquilha .....	9
2.2.1	Processo de Vazamento por Gravidade .....	9
2.2.2	Processo de Vazamento em Coquilhas Rotativas.....	10
2.2.2.1	Processo Durville e Semi-Durville .....	15
2.2.2.2	Processo Barbedo.....	17
2.2.3	Processo de Vazamento por Baixa Pressão .....	22
2.2.4	Materiais Tradicionalmente Usados na Construção de Coquilhas .....	28
2.2.5	Tensões de Origem Térmica em Coquilhas.....	32
2.3	Sistemas de Refrigeração .....	38
2.4	Sistemas de Vácuo .....	45
2.5	Ligas Usadas para Vazamento em Coquilha .....	46
2.5.1	Introdução .....	46
2.5.2	Ligas de Alumínio .....	48
2.5.2.1	Origem das Ligas de Alumínio .....	48
2.5.2.2	Denominação das Ligas de Alumínio.....	51
2.5.2.3	Efeito dos Elementos de Liga .....	53
2.5.2.4	Fluidez e Aptidão para obtenção de Revestimentos de Protecção e decoração 59	
2.5.2.5	Outras Características Esperdas nas Peças Produzidas.....	61
2.5.2.6	Ligas de 1ª Fusão e Ligas de 2ª Fusão .....	65
2.5.2.7	Defeitos de Fundição Associados às Ligas de Alumínio.....	69
2.5.3	Fusão e Tratamentos no Estado Líquido .....	80
2.5.3.1	Fusão do Alumínio.....	80
2.5.3.2	Fornos de Fusão e Manutenção .....	83
2.5.3.3	Efeito da Temperatura e dos Tempos de Espera.....	90
2.5.3.4	Formação de Escória.....	91

2.5.3.5	Afinação de Grão.....	92
2.5.3.6	Modificação.....	93
2.5.3.7	Presença de Hidrogénio.....	95
2.5.3.8	Desgasificação.....	97
2.5.3.9	Fluxos .....	101
2.5.4	Liga Usada pela STA para Puxadores.....	104
2.5.4.1	AlMg4Zn.....	104
2.6	Revestimentos Usados em Coquilhas.....	107
2.6.1	Introdução .....	107
2.6.2	Transferência de Calor .....	108
2.6.3	Controlo da Fluidez do Metal .....	110
2.6.4	Extracção.....	111
2.6.5	Acabamento Superficial .....	112
2.6.6	Duração do Revestimento .....	113
2.6.7	Temperatura da Moldação .....	114
2.6.8	Espessura do Revestimento.....	115
2.6.9	Método de Aplicação .....	116
2.7	Sistemas para Transferência de Metal.....	118
2.8	Simulação Numérica do Enchimento e Solidificação .....	119
2.8.1	Modelos de Discretização .....	120
2.8.1.1	Método do Elementos Finitos – MEF .....	121
2.8.1.2	Método dos Volumes Finitos – MVF.....	122
3	Projecto Assistido por Simulação para Coquilhas Rotativas com Eixo Longitudinal....	125
3.1	Modelação e Simulação das Coquilhas .....	127
3.1.1	Puxador EN179.....	127
3.1.2	Puxador 822 .....	152
3.1.3	Puxador 3253 .....	157
3.2	Caracterização das Peças Obtidas – Manípulo 3253.....	160
3.2.1	Inspecção Visual (STA) .....	160
3.2.2	Amostragem Metalográfica.....	161
4	Conclusão e Sugestão de Trabalhos Futuros .....	171
4.1	Conclusão .....	171
4.2	Trabalhos Futuros.....	172
5	Bibliografia .....	173

---

## Índice de Figuras

Fig. 1 – Esquema das etapas de um processo de fundição para o fabrico de uma peça nova ....	6
Fig. 2 – Classificação dos processos de moldações permanentes .....	8
Fig. 3 – Esquema do sistema de vazamento por gravidade .....	9
Fig. 4 – Máquina do sistema de vazamento em coquilha rotativa.....	10
Fig. 5 – Relação entre velocidade de rotação e ângulo de inclinação inicial na capacidade de obtenção de peças cheias .....	12
Fig. 6 – Esquema de funcionamento do Processo Semi-Durville .....	16
Fig. 7 – Molde de uma jante de automóvel.....	22
Fig. 8 – Esquema demonstrativo do processo de baixa pressão .....	22
Fig. 9 – Identificação dos componentes envolvidos num sistema de baixa pressão .....	23
Fig. 10 – Máquina do sistema de baixa pressão .....	25
Fig. 11 – Deslocamento restricto a zero numa direcção.....	32
Fig. 12 – Deslocamento restricto a zero em duas direcções .....	33
Fig. 13 – Deslocamento restricto a zero em três direcções .....	33
Fig. 14 – Encurvadura de uma barra sujeita a um gradiente térmico. Se a distribuição da temperatura ao longo da barra for linear, não há tensões térmicas.....	34
Fig. 15 – Tensões térmicas devido a uma distribuição linear de temperaturas (dT) quando o encurvamento é impedido.....	35
Fig. 16 – A máxima tensão térmica devida a uma distribuição não linear das temperaturas numa coquilha livre de escorregar no prato de uma coquilhadora é proporcional a: $\Delta T_{Max} = T_{Max} - T_{FN}$ , onde $T_{Max}$ é a temperatura de face quente e $T_{FN}$ é a temperatura de fibra neutra (isenta de tensões térmicas) .....	35
Fig. 17 – Esquema para reduzir as tensões térmicas diminuindo $\Delta T_{Max}$ .....	36
Fig. 18 – Efeito de uma barreira térmica na redução de $\Delta T_{Max}$ .....	36
Fig. 19 – Manipulador para varrer as superfícies das coquilhas, lendo as temperaturas e arrefecendo-as por sopragem de ar ou mistura ar-água .....	40
Fig. 20 – Esquema genérico de um tubo de refrigeração .....	43
Fig. 21 - Implementação dos tubos de refrigeração num molde permanente.....	44
Fig. 22 – Sistema de refrigeração .....	44
Fig. 23 – Esquema de montagem de um sistema de vácuo numa coquilha.....	45
Fig. 24 – Esquema de obtenção do alumínio.....	48
Fig. 25 – Esquema de reaproveitamento das sucatas de alumínio.....	68
Fig. 26 – Poros causados por aprisionamento de gases.....	75
Fig. 27 – Rechupe .....	76
Fig. 28 – Microrechupes .....	77
Fig. 29 – Fissuração a quente .....	78
Fig. 30 – Capacidade térmica do alumínio. Após chegar á temperatura de fusão são necessários mais 393 kJ/kg antes de o alumínio passar ao estado líquido. ....	80
Fig. 31 – Forno de cadinho que permite a rotação para facilitar o vazamento.....	84
Fig. 32 – Forno de cadinho fixo para ligas de alumínio .....	85
Fig. 33 – Forno de revérbero basculante .....	86

Fig. 34 – Forno de indução sem núcleo .....	88
Fig. 35 – Forno de indução por canal.....	89
Fig. 36 – Efeito da modificação estrutural na microestrutura de algumas ligas .....	94
Fig. 37 – Propriedades mecânicas em função do conteúdo de gás, liga de alumínio A356. ...	95
Fig. 38 – Gráfico Solubilidade vs. Temperatura vs. % de hidrogénio .....	96
Fig. 39 – Influência da temperatura na solubilidade do hidrogénio.....	96
Fig. 40 – Esquema da desgasificação rotativa .....	97
Fig. 41 – Esquema do mecanismo de desgasificação e da remoção de inclusões .....	98
Fig. 42 – Esquema de desgasificação.....	99
Fig. 43 – Remoção do hidrogénio em função do diâmetro das bolhas. Resultados para dois tratamentos que variam na concentração do gás usado.....	99
Fig. 44 – Comparação da liga A356.0 vazada sob 100mm de pressão, que pode ser usada para controlo da porosidade. O número do centro indica a percentagem de área com poros, o número inferior indica a densidade.....	100
Fig. 45 – Diagrama de equilíbrio do composto ternário Al-Mg-Zn.....	104
Fig. 46 – Exemplo de aplicação da liga – Pilar de suporte de rail .....	105
Fig. 47 – Exemplo de aplicação da liga – Tanque de camião .....	105
Fig. 48 – Solidificação direcciona .....	109
Fig. 49 – Comparação entre dois tipos diferentes de revestimentos .....	110
Fig. 50 – Formação de uma junta fria .....	110
Fig. 51 – Revestimento fino vs. Revestimento grosseiro.....	111
Fig. 52 – Isolamento vs. Espessura do revestimento .....	115
Fig. 53 – Temperatura da coquilha vs. Abrasão .....	115
Fig. 54 – Representação do modo correcto de aplicação de revestimento .....	117
Fig. 55 – Volume de controlo associado ao vértice p da malha.....	123
Fig. 56 – CAD do puxador EN179 .....	127
Fig. 57 – Geometrias inicialmente propostas para o sistema de gitagem do puxador EN179	127
Fig. 58 – Escalas de temperaturas e tempo .....	128
Fig. 59 – Simulação do enchimento da geometria A para 30 °s .....	128
Fig. 60 – Simulação de enchimento da geometria B para 30°/s.....	128
Fig. 61 – Simulação de enchimento da geometria A para 18°/s.....	129
Fig. 62 – Simulação de enchimento da geometria B para 18°/s.....	129
Fig. 63 – Simulação de enchimento da geometria C para 18°/s.....	130
Fig. 64 – Simulação de enchimento da geometria C para 18°/s.....	130
Fig. 66 – Comparação entre as 4 geometrias para 28° de inclinação .....	131
Fig. 67 – Comparação entre as 4 geometrias para 70° .....	132
Fig. 68 – Comparação entre as 4 geometrias para 90° .....	132
Fig. 70 – Perfil de velocidades da versão A para 78 e 82° respectivamente .....	133
Fig. 71 – Perfil de velocidades da versão E para 28 e 46° respectivamente .....	134
Fig. 72 – Perfil de velocidades da versão E para 68 e 76° respectivamente .....	134
Fig. 73 – Perfil de velocidades da versão D para 40 e 45° respectivamente .....	135
Fig. 74 – Perfil de velocidades da versão D para 77 e 90° respectivamente .....	135
Fig. 75 – Perfil de velocidades da versão D para 40 e 45° respectivamente .....	136
Fig. 76 – Perfil de velocidades da versão D para 80 e 87° respectivamente .....	136

Fig. 77 – Relação de áreas das versões A, E e F .....	138
Fig. 78 – Análise do enchimento da versão E (1).....	138
Fig. 79 – Análise do enchimento da versão E (3).....	139
Fig. 80 – Análise do enchimento da versão E (3).....	139
Fig. 81 – CAD dos ataques cilíndricos hexagonais .....	140
Fig. 82 – Análise do enchimento da versão F com ataques cilíndricos (1) .....	140
Fig. 83 – Análise do enchimento da versão F com ataques cilíndricos (2) .....	141
Fig. 84 – Análise do enchimento da versão F com ataques cilíndricos (3) .....	141
Fig. 85 – Análise do enchimento da versão F com ataques hexagonais (1).....	142
Fig. 86 – Análise do enchimento da versão F com ataques hexagonais (2).....	142
Fig. 87 – Análise do enchimento da versão F com ataques hexagonais (3).....	143
Fig. 88 – Análise do perfil de velocidades versão E .....	143
Fig. 89 – Análise do perfil de velocidades versão F com ataques cilíndricos.....	144
Fig. 90 – Análise do perfil de velocidades versão F com ataques hexagonais.....	144
Fig. 91 – Análise solidificação das diferentes versões .....	146
Fig. 92 – Colocação dos machos na versão E e F.....	147
Fig. 93 – Versão E com e sem machos (arrefecedores).....	147
Fig. 94 – Versão F sem machos e com machos a 40 e 80°C .....	148
Fig. 95 – Novas secções do sistema de gitagem.....	149
Fig. 96 – Bacia de vazamento.....	150
Fig. 97 – Sistema de vácuo e termopares .....	150
Fig. 98 – Conjunto parcial da coquilha .....	151
Fig. 99 – CAD do puxador 822 .....	152
Fig. 100 – Enchimento do modelo 822 por gravidade e rotação (1) .....	152
Fig. 101 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento (1) .....	153
Fig. 102 – Enchimento do modelo 822 por gravidade e rotação (2) .....	153
Fig. 103 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento por gravidade .....	154
Fig. 104 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento por rotação .....	154
Fig. 105 – Resultado da solidificação.....	155
Fig. 106 – Últimas zonas a arrefecer .....	155
Fig. 107 – Solidificação simulando o efeito do revestimento .....	156
Fig. 108 – CAD do puxador 3 .....	157
Fig. 109 – Análise do enchimento por gravidade e rotação .....	157
Fig. 110 – Análise do enchimento, posição final .....	158
Fig. 111 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento (1) .....	158
Fig. 112 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento (2) .....	159
Fig. 113 – Solidificação no fim do processo de enchimento.....	159
Fig. 114 – Amostras F1, F2 e F3 .....	161
Fig. 115 – Amostras D1, D2 e D3 .....	162
Fig. 116 – Metalografia da amostra F1, zona A e B: Cima.....	164
Fig. 117 – Metalografia da amostra F1, zona A e B: Baixo.....	164
Fig. 118 – Metalografia da amostra F1, zona A e B: Meio .....	165
Fig. 119 – Metalografia da amostra F2, zona A e B: Cima.....	165
Fig. 120 – Metalografia da amostra F2, zona A e B: Baixo.....	165

Fig. 121 – Metalografia da amostra F2, zona A e B: Meio.....	166
Fig. 122 - Metalografia da amostra F3, zona A e B: Cima .....	166
Fig. 123 – Metalografia da amostra F3, zona A e B: Baixo .....	166
Fig. 124 – Metalografia da amostra F3, zona A e B: Meio.....	167
Fig. 125 – Metalografia da amostra D1, zona A e B: Cima.....	167
Fig. 126 – Metalografia da amostra D1, zona A e B: Baixo.....	167
Fig. 127 – Metalografia da amostra D1, zona A e B: Meio .....	168
Fig. 128 – Metalografia da amostra D2, zona A e B: Cima.....	168
Fig. 129 – Metalografia da amostra D2, zona A e B: Baixo.....	168
Fig. 130 – Metalografia da amostra D2, zona A e B: Meio .....	169
Fig. 131 – Metalografia da amostra D3, zona A e B: Cima.....	169
Fig. 132 – Metalografia da amostra D3, zona A e B: Baixo.....	169
Fig. 133 – Metalografia da amostra D3, zona A e B: Meio .....	170

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Materiais recomendados para moldações permanentes .....	30
Tabela 2 - Materiais recomendados para pequenos machos ( $\phi < 75\text{mm}$ , $L < 250\text{mm}$ ) para vazamento em coquilha .....	30
Tabela 3 - Materiais recomendados para machos de grandes dimensões ( $\phi > 75\text{mm}$ , $L > 250\text{mm}$ ) para vazamento em coquilha .....	31
Tabela 4 - Coeficientes de transferência de calor em diversas .....	42
Tabela 5 – Temperaturas de trabalho de coquilhas utilizadas no vazamento de diversas ligas .....	47
Tabela 6 – Características gerais do alumínio .....	49
Tabela 7 – Comparação de algumas propriedades do alumínio com outros metais .....	50
Tabela 8 – Colabilidade e aptidão aos revestimentos de protecção e decoração dos principais processos de fundição .....	59
Tabela 9 - Comparação entre as diferentes ligas de alumínio usadas em fundição (2) .....	60
Tabela 10 - Comparação das ligas de alumínio relativamente à fissuração a quente, estanqueidade, maquinabilidade e resistência á corrosão .....	61
Tabela 11 - Comparação das propriedades mecânicas das ligas vazadas pelos processos de fundição em areia e em coquilha .....	62
Tabela 12 – Comparação de algumas características térmicas e eléctricas .....	63
Tabela 13 – Aplicações das ligas de alumínio .....	64
Tabela 14 – Comparação do coeficiente de expansão linear do alumínio e outros metais .....	78
Tabela 15 - Adição de Ti para o refinamento das ligas Al-Si .....	92
Tabela 16 – Fluxos nucleantes .....	93
Tabela 17 – Equação química que traduz a presença de hidrogénio .....	96
Tabela 18 – Composição química da liga AG4Z .....	126
Tabela 19 – Defeitos encontrados na amostra F1 .....	162
Tabela 20 – Defeitos encontrados na amostra F2 .....	163
Tabela 21 – Defeitos encontrados na amostra F3 .....	163
Tabela 22 – Defeitos encontrados na amostra D1 .....	163
Tabela 23 – Defeitos encontrados na amostra D2 .....	163
Tabela 24 – Defeitos encontrados na amostra D3 .....	164





## **1 Introdução Geral**

### **1.1 Introdução**

Este trabalho faz parte da disciplina de Dissertação/Projecto Final do curso de engenharia mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foi realizado na empresa, INEGI, durante 4 meses e meio. Aborda a temática dos processos de vazamento em moldações permanentes e alguns assuntos inerentes a este tema. É feita também uma introdução á simulação computacional, sendo concluído com uma parte prática.

### **1.2 Apresentação das Empresas**

#### **INEGI**

O INEGI é uma Instituição de interface entre a Universidade e a Indústria vocacionada para a realização de actividade de Inovação e Transferência de Tecnologia orientada para o tecido industrial. Nasceu em 1986 no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Mantém ainda hoje essa ligação insubstituível ao DEMEC, que constitui uma das principais fontes de conhecimento e competências científicas e tecnológicas. Ao longo dos seus 20 anos de existência desenvolveu e consolidou uma posição de parceiro da indústria em projectos de I&D, sendo que presentemente cerca de 60% da sua actividade resulta de projectos com empresas. Com a figura jurídica de Associação Privada sem Fins Lucrativos e com o estatuto de «Utilidade Pública», assume-se como um agente activo no desenvolvimento do tecido industrial Português e na transformação do modelo competitivo da indústria nacional.

#### **Missão**

Contribuir para o aumento da competitividade da indústria nacional através da investigação e desenvolvimento, demonstração, transferência de tecnologia e formação nas áreas de concepção e projecto, materiais, produção, energia, manutenção, gestão industrial e ambiente.

### Visão

Ser uma Instituição de referência, a nível nacional, e um elemento relevante do Sistema Científico e Tecnológico Europeu, com mérito e excelência na Inovação de base Tecnológica e Transferência de Conhecimento e Tecnologia.

### Politica de Qualidade

Promover a melhoria contínua do desempenho da Organização na concretização dos seus objectivos estratégicos e operacionais, procurando permanentemente elevar o nível de satisfação de todas as partes interessadas, e assumindo o Sistema de Gestão da Qualidade como um instrumento essencial a esse desiderato.

### **STA, Sociedade Transformadora de Alumínios, SA**

A STA, Sociedade Transformadora de Alumínios, SA, constituída em 1989 em parceria com o grupo belga Sobinco, é uma empresa especializada no desenvolvimento e produção de sistemas para portas e janelas.

É desde 2006 uma empresa certificada segundo a norma ISO 9001:2000, e conta com uma equipa de 155 profissionais qualificados. Representando a marca Sofi, implantada no mercado há mais de 40 anos, são referência de Tecnologia, Inovação, Design, Qualidade e Durabilidade.

A Sobinco, constituída em 1961, dedica-se à mesma actividade com a particularidade de desenvolver soluções especializadas e adequadas às necessidades das empresas extrusoras e gamistas. Sobinco é uma das marcas de maior prestígio internacional e é líder na Europa, empregando uma equipa de 350 profissionais.

STA e Sobinco apostam hoje fortemente numa cooperação estreita ao nível da Investigação e Desenvolvimento de novos produtos, partilhando os seus potenciais tecnológicos e industriais, assim maximizando o seu know-how. Símbolo desta filosofia é a nova imagem, que tal como ‘Ying e Yang’ sublimam o melhor das duas realidades.

## Visão

Ser líderes nos mercados em que actuamos, sendo avaliados pelos nossos clientes, na satisfação, profissionalismo, qualidade e inovação.

Desejam que a equipa combine, conhecimento técnico com o reconhecimento das necessidades dos clientes bem como dos mercados onde actuam.

Desejam que a base do serviço prestado sejam os colaboradores motivados e a acreditem fortemente no valor do seu trabalho.

## Missão

A missão da STA consiste em produzir e comercializar ferragens para portas, janelas e respectivos serviços associados, que satisfaçam as necessidades dos clientes com respeito pelos accionistas, colaboradores, ambiente e comunidade envolvente.

## **1.3 Estrutura do Relatório**

Este trabalho encontra-se dividido em 4 capítulos que descrevem de forma detalhada o trabalho teórico e experimental desenvolvido. O primeiro capítulo introduz o tema de dissertação e apresenta os principais objectivos deste trabalho.

### **Capítulo 2: Estado da Arte**

Neste capítulo é feita a introdução ao processo de moldações permanentes e às diferentes variantes deste processo descrevendo de forma sucinta as vantagens, desvantagens e dificuldades encontradas durante o vazamento utilizando este processo. Neste capítulo descrevem-se também algumas das características do alumínio, que vão desde o processo de obtenção, tratamentos, passando pelas vantagens e desvantagens do emprego do mesmo, finalizando com os problemas que podemos encontrar ao utilizar algumas ligas deste elemento. No fim do capítulo faz-se uma abordagem aos diferentes modelos de discretização utilizados no processo de simulação de enchimento e solidificação.

### **Capítulo 3: Trabalho Experimental**

Neste capítulo são apresentados os equipamentos necessários para o desenvolvimento do trabalho, assim como todas as técnicas, protótipos e observações decorrentes destes.

### **Capítulo 4: Conclusões e Trabalhos Futuros**

São apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido bem como propostas para trabalhos de desenvolvimento futuro.

## 2 Estado da Arte

### 2.1 Introdução

“O objectivo fundamental da fundição é o de dar forma geométrica adequada ao metal, vertendo-o no estado fundido dentro de uma cavidade feita no interior de uma moldação (conjunto de elementos em materiais apropriados que definem o molde), para após solidificação se obter a peça moldada”. (Ferreira, 1999)

A fundição é uma tecnologia milenar que tem conhecido, desde o início do século XX, um rápido desenvolvimento, sendo hoje um dos processos mais utilizados na produção de componentes metálicos para as mais diversas aplicações – estima-se que 90% de todos os equipamentos, ferramentas e utensílios existentes incorporam peças fundidas.

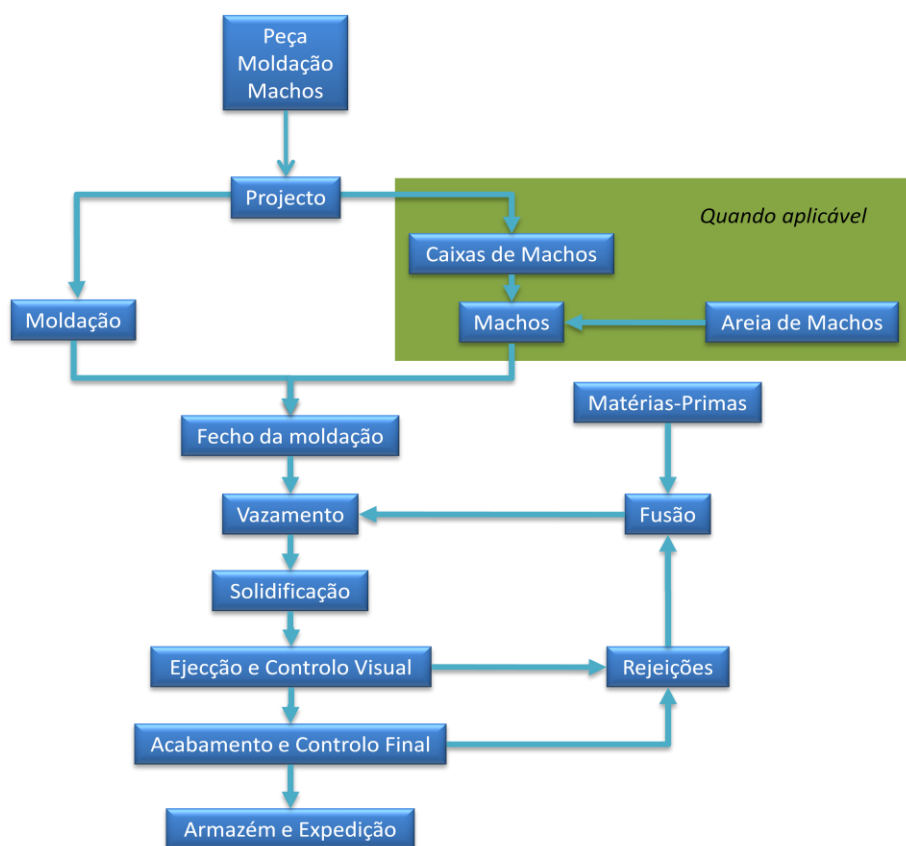
É possível apontar uma série de factores responsáveis pela utilização generalizada dos diferentes processos de fundição:

- Utilização de matérias-primas e subsidiárias relativamente abundantes na superfície terrestre – esta é uma das razões pelas quais a fundição é praticada desde a antiguidade.
- Baixos custos de fabrico quando comparados com outros processos industriais.
- Possibilidade de obtenção de peças de volumes e pesos muito diferentes, desde poucos gramas a mais de cem toneladas.
- Possibilidade de obtenção de peças com grande complexidade geométrica.
- Possibilidade de fundição de praticamente qualquer tipo de liga metálica.
- Viabilidade económica, na maioria dos casos, para uma determinada quantidade de peças a fabricar.

A fundição foi tida, durante muito tempo, como uma tecnologia incapaz de proporcionar a obtenção de produtos com boa precisão dimensional e/ou acabamento superficial, obrigando normalmente ao recurso a operações de acabamento complementares, como por exemplo a maquinagem.

De facto, a existência actual de diversos processos distintos de obtenção de um fundido, possuindo cada um deles características e potencialidades bem diferentes, confere à tecnologia da fundição uma combinação de características de qualidade, versatilidade e flexibilidade dificilmente igualáveis por outros processos industriais de obtenção de peças.

No entanto, a satisfação dos tradicionais requisitos impostos à indústria da fundição (nomeadamente boas características mecânicas das peças, a ausência de defeitos internos e garantia de microestruturas compatíveis com o futuro desempenho dos fundidos) já não é suficiente. Actualmente, as exigências que se colocam às peças fundidas são diferentes em qualidade e quantidade, particularmente no que concerne às peças destinadas às indústrias automóvel, aeronáutica e electrónica. O desenvolvimento tecnológico que estas indústrias têm vindo a conhecer nos últimos anos, levou à procura de produtos, nomeadamente fundidos, cada vez mais leves, mais perfeitos, passíveis de utilização imediata, sem recurso às sempre morosas e dispendiosas operações de acabamento posteriores.



**Fig. 1 – Esquema das etapas de um processo de fundição para o fabrico de uma peça nova**

A fundição é, portanto, uma tecnologia em constante desenvolvimento, sempre na procura das melhores respostas aos novos desafios que lhe são colocados.

De acordo com Ferreira (1999), os processos de fundição podem ser classificados de acordo com o carácter de permanência ou de perecibilidade dos respectivos moldes/modelos e moldações. Surgem assim três tipos de fundidos distintos:

- Processos com moldação não permanente e molde permanente
- Processos com moldação e molde não permanente
- Processos com moldação permanente

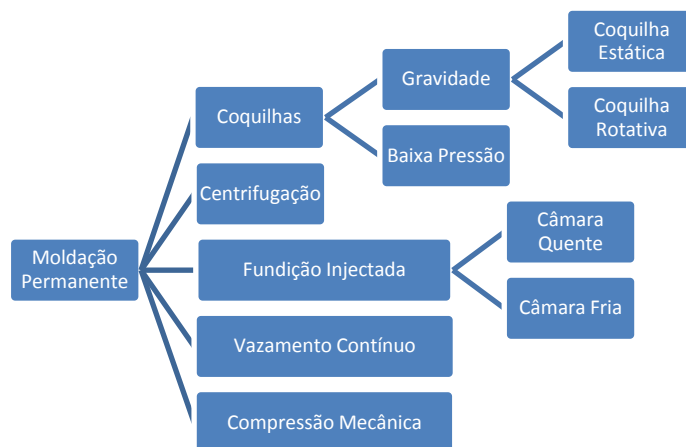
No primeiro destes três tipos são utilizadas moldações de areia ou de outros materiais refractários (cerâmica ou gesso) que se abrem (normalmente em duas partes, divididas por um plano de apartação) permitindo que o molde seja retirado do seu interior (cavidade) antes de nele ser vazado metal líquido. Assim, dependendo das características mecânicas do material em que o molde for feito (madeira, metal, etc.), este pode ser utilizado na obtenção de um número muito elevado de peças. Quanto à moldação, ela só serve para a obtenção de uma única peça, uma vez que, depois de nela ter sido vazado metal líquido, tem de ser destruída para dela se poder retirar a peça fundida.

O segundo tipo de processos de fundição distingue-se deste último pelo facto de a moldação ser construída envolvendo o molde e não podendo ser aberta para de lá o retirar. Desta forma, o molde tem de ser destruído de forma a libertar a cavidade onde será posteriormente vertido metal líquido. A forma de destruição do molde (normalmente construído em cera ou em poliestireno expandido) pode ser por liquefação ou por sublimação, em ambos os casos como resultado de um aquecimento. Para extrair a peça fundida (depois de solidificada) da moldação torna-se necessário destruí-la, consequência da forma como ela é construída.

Os processos de fundição com moldação permanente distinguem-se portanto dos demais pelo facto de cada moldação permitir a obtenção de um número elevado de peças. Claro está que o material em que a moldação é feita deve ter características mecânicas apropriadas, e principalmente uma elevada resistência ao desgaste. Normalmente as moldações permanentes são construídas em metal, podendo em alguns casos ser construídas em materiais cerâmicos, mormente em grafite. O facto de a moldação ser permanente implica que estes processos se diferenciem em muito dos demais, conforme se verá nos capítulos subsequentes.



Moldações permanentes são, assim, todas aquelas que permitam a obtenção de várias peças sem que as suas características ou forma sejam significativamente alteradas. Embora esta definição compreenda todas as moldações metálicas, ela estende-se igualmente às moldações de grafite e de outros materiais que se abrem para permitir a retirada da peça fundida sem se danificarem.



**Fig. 2 – Classificação dos processos de moldações permanentes**

Dada a abrangência deste conceito, é apenas natural a existência de uma grande diversidade de técnicas de fundição que nele se enquadram, as quais serão analisadas em capítulos posteriores. [Ferreira, 1999]

## 2.2 Fundição em Coquilha

Normalmente a fundição em coquilha pode dividir-se em dois sub-processos, a fundição em coquilha por gravidade e a fundição em coquilha por baixa pressão. O processo de vazamento por gravidade pode ser dividido em mais dois processos, vazamento em coquilha fixa e vazamento em coquilha rotativa.

### 2.2.1 Processo de Vazamento por Gravidade

O processo de fundição em moldação metálica com vazamento por gravidade consiste em obter um fundido a partir do vazamento de metal líquido no interior de uma moldação metálica, também designada por molde ou coquilha, sendo o enchimento conseguido através da (simples) acção da força de gravidade.

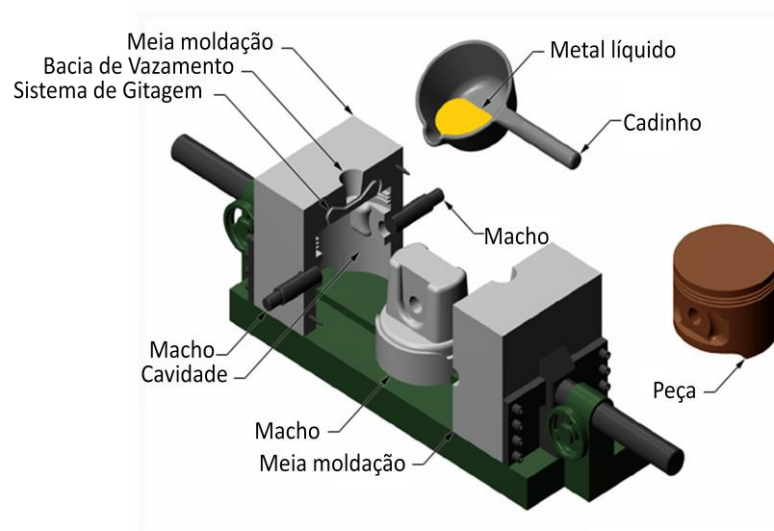


Fig. 3 – Esquema do sistema de vazamento por gravidade

“Na fundição por gravidade em moldações permanentes o metal líquido é vazado por pressão gravítica num molde metálico, constituído por duas ou mais partes, o qual é usado repetidamente para a produção de peças com a mesma forma. Para definir as cavidades das peças vazadas são usualmente feitos machos simples removíveis em metal, mas alguns mais complexos são feitos em areia ou cerâmica. Quando se usam machos em areia ou cerâmica, o processo é denominado de fundição em moldações semi-permanentes”. [Torres, 2000]

Existem duas técnicas de vazamento sob acção da gravidade: o vazamento estático, onde o metal é introduzido no topo do molde através do gito de descida; e o vazamento inclinável, onde o metal é vazado numa bacia, enquanto o molde está numa posição horizontal, fluindo para a cavidade à medida que o molde é gradualmente inclinado para a posição vertical. Esta operação deverá ser efectuada simultaneamente com um movimento de basculamento da moldação, de forma a diminuir a turbulência gerada durante o enchimento. Por outro lado, iniciando-se o vazamento com a moldação numa posição próxima da horizontal, consegue-se que, durante a fase de enchimento, todo o ar presente no interior da coquilha seja removido através dos canais previstos para esse fim, ou através dos próprios alimentadores. Estes detalhes serão aprofundados no próximo capítulo.

### 2.2.2 Processo de Vazamento em Coquilhas Rotativas

A coquilha rotativa essencialmente remove o efeito de turbulência gerado na altura de queda livre que se costuma verificar no início do processo de vazamento. Uma bacia, colocada na posição horizontal, pode ser enchida de metal, limitando a queda livre a apenas alguns centímetros. Quando se inicia o movimento de rotação, o metal começa a fluir para o interior da cavidade do molde, minimizando a turbulência que acompanha a queda de metal. Para tal é necessário que a bacia esteja a abastecer as zonas mais maciças da peça, à medida que as áreas da peça mais afastadas da bacia vão solidificando.



**Fig. 4 – Máquina do sistema de vazamento em coquilha rotativa**

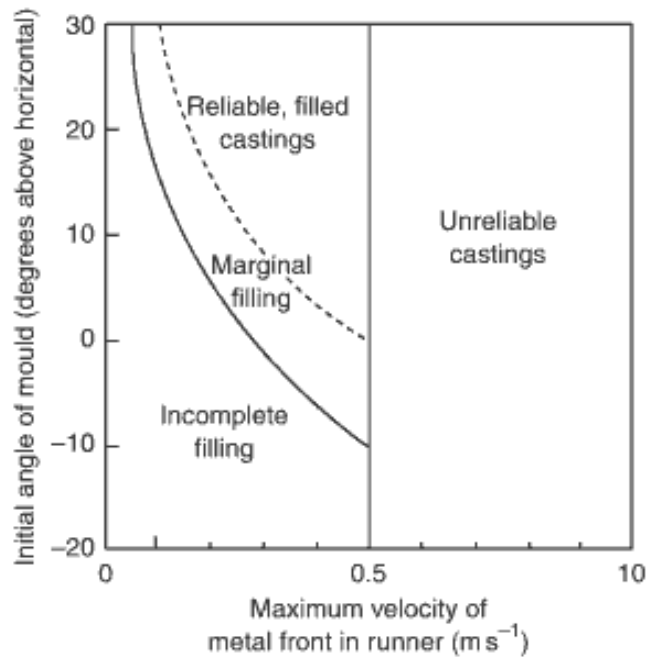
É essencial que a escolha do plano de apartação seja correcta para que a peça e todo o sistema de gitagem não apresentem contrasaídas, mantendo assim a sanidade da peça e do molde. Peças que apresentem zonas maciças devem estar orientadas de forma que essas zonas fiquem posicionadas na linha de partição, bem como todo o sistema de gitagem.

O processo foi inicialmente desenvolvido por P. H. G. Durville, no início do século XX, tema que irá ser abordado com maior ênfase no próximo capítulo. Nos E.U.A., *Stahl* (1961) popularizou este processo para as ligas de alumínio, tornando-o num processo de moldações permanentes. Numa tentativa de perceber o processo com maior profundidade, *Nguyen e Carring* (1986), simularam o processo usando como líquido água e em 1995 *Kim e Hong* fizeram as primeiras simulações recorrendo à utilização de computadores. Eles descobriram que uma combinação de forças de gravidade, centrifugação e *Coriolis*, governavam o fluxo de metal para o interior do molde. Contudo dadas as baixas velocidades de rotação utilizadas neste processo, os efeitos devido às forças de centrifugação e de *Coriolis* representam apenas 10% dos efeitos totais dessas forças podendo portanto ser desprezados comparativamente aos efeitos produzidos pela força da gravidade. A velocidade angular de rotação do molde também contribui para a velocidade linear da frente do líquido.

O primeiro estudo detalhado sobre este processo foi levado a cabo por *Mi* (2002) e introduziu pela primeira vez o conceito de velocidade crítica e turbulência superficial. O processo foi controlado através de um computador que possuía uma roda programável á qual eram fixos moldes de areia para produzir peças numa liga de Al-4.5%Cu. O fluxo de metal durante o enchimento do molde foi gravado recorrendo a uma câmara de raios X, sendo que a garantia da qualidade das peças foi calculada através dos parâmetros estatísticos de *Weibull*. Armado com estas técnicas, *Mi* descobriu que a uma velocidade de rotação reduzida as tensões superficiais geradas e as películas de escória formadas não podiam ser desprezadas. O escoamento a velocidades de rotação reduzidas é afectado, significativamente, por tensões superficiais, muito provavelmente devido á presença de películas de óxidos muito resistentes.

Além disso, a uma velocidade de rotação inferior a 7° por segundo o fluxo de metal é “travado” ao chegar ao fim do canal de gitagem, uma vez que o efeito da gravidade só é notório a partir de um elevado grau de inclinação.

Como acontece em vários processos de fundição, se forem executados a velocidades reduzidas, leva ao “congelamento” do fluxo de metal fazendo com que no final as peças obtidas apresentem falta de metal. Se estes forem executados a velocidades elevadas levam á criação de turbulência superficial dando origem a peças de baixa qualidade. As gravações efectuadas revelaram que, o metal líquido podia apresentar um fluxo tranquilo ou caótico, dependendo do (i) ângulo de inclinação da moldação, (ii) a velocidade de rotação do molde (Fig.



**Fig. 5 – Relação entre velocidade de rotação e ângulo de inclinação inicial na capacidade de obtenção de peças cheias**

5). A qualidade das peças obtidas podia então ser directamente ligada aos parâmetros anteriormente definidos. Inicialmente, o metal é introduzido percorrendo o caminho até ao fim do canal de alimentação, só depois é activado o processo de rotação do molde. [Yu, 2002] [Heine, Loper, & Rosenthal, 1967] [Campbell, Castings Practice: The 10 Rules of Castings, 2004]

Três posições de início foram investigadas:

- Se o molde começar numa posição bastante inclinada, quando o metal entrar no sistema está imediatamente instável, é acelerado pela gravidade atingindo o fim do canal de alimentação provocando um efeito de “splash”, dando origem a peças de fraca qualidade.
- Se o molde estiver na horizontal o metal só começa a fluir quando se atingir uma inclinação suficiente para que tal ocorra, atingido este ponto a altura entre o início e o fim do canal de alimentação é superior á altura crítica. Contudo, apesar do aumento da capacidade de produzir peças de boa qualidade aumentar ainda persistem alguns problemas relativamente á qualidade das peças obtidas.
- Se o molde estiver inclinado, ligeiramente, no sentido oposto ao de rotação durante o enchimento do depósito, sucede que ao atingir-se uma inclinação suficiente para o metal começar a fluir o ângulo de inclinação do alimentador ainda está na horizontal. A natureza do líquido introduzido no sistema é portanto diferente. No início do enchimento do canal de alimentação, este está ligeiramente inclinado no sentido oposto ao de rotação, impedindo o metal de entrar no canal com uma velocidade indesejável, fazendo com que o processo seja mais estável. O metal só começa a fluir iniciando a rotação do molde, sendo possível controlar a velocidade de escoamento de acordo com a inclinação, podendo garantir que o metal chega ao fim do canal de alimentação a uma velocidade praticamente igual a zero. Uma redução tão drástica de velocidade é contra-produtivo, uma vez que envolve grandes perdas de calor, sendo portanto não recomendado. Mesmo a velocidades de rotação da ordem dos 30° por segundo a velocidade do metal no fim do canal de alimentação não excedeu os 0.5 m/s (velocidade crítica), dando origem a peças de boa qualidade, sendo portanto um processo repetível.

A característica mais importante das referidas anteriormente, é que quando se dá a transferência de metal a superfície do líquido permanece na horizontal durante todo o processo, podendo então considerar-se que a condição óptima para este processo é que a transferência se dê sempre na horizontal. Uma transferência deste tipo requer que se escolha o ângulo correcto acima da linha horizontal, assim como a velocidade de escoamento.

Reconhece-se que as condições que possibilitam a criação deste gráfico dependem das características geométricas do molde em que se pretende fabricar a peça. Portanto, *Mi*, tomou isso em consideração e utilizou um molde com dimensões e formas próximas das usadas em grandes fundições industriais, particularmente das indústrias de componentes automóveis. Apesar dos resultados obtidos requererem adaptação a outras geometrias, os princípios de utilização são claros: existem condições de utilização que, independentemente da geometria da peça, não são recomendáveis, mas em que a transferência horizontal do metal é possível e gera peças de elevada qualidade. [Yu, 2002] [Heine, Loper, & Rosenthal, 1967] [Campbell, 2004]

### 2.2.2.1 Processo Durville e Semi-Durville

Um processo de vazamento com basculamento, denominado “Durville” ou “Vazamento Tranquilo” foi desenvolvido, no início do século XX, por P. H. G. Durville. O objectivo era melhorar a qualidade interna e superficial de lingotes de bronze de alumínio, vazados em moldações permanentes metálicas destinados a posterior forjamento.

O alumínio deste bronze fundido forma filmes de óxido de alumínio que podem proteger o material de maior oxidação e impedir a adesão dos lingotes às coquilha sem que são ou eram vazados. Mas, quando a turbulência quebra este filme e arrasta partes deste para o interior das peças vazadas, as inclusões de filmes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reduzem fortemente a resistência e a ductilidade do material. O “processo de Durville” foi desenvolvido com o objectivo de reduzir ou evitar estes inconvenientes.

Para isso Durville eliminou o sistema de enchimento e substituiu o enchimento em queda por um transvasamento directo e lento no forno para a moldação.

No “processo de Durville” a colher de vazamento, o canal de vazamento e a coquilha propriamente dita, estavam todos rigidamente ligados e rodavam em conjunto quase  $180^\circ$  por basculamento em torno de um eixo paralelo ao plano de apartação, quando este existia.

Entretanto o “processo Durville” embora continuando a manter duas das suas características iniciais:

- Ausência de sistema de gitagem
- Rotação em torno de um eixo paralelo ao plano de apartação

Sofreu as seguintes evoluções (Pascal Cuoq, 2000):

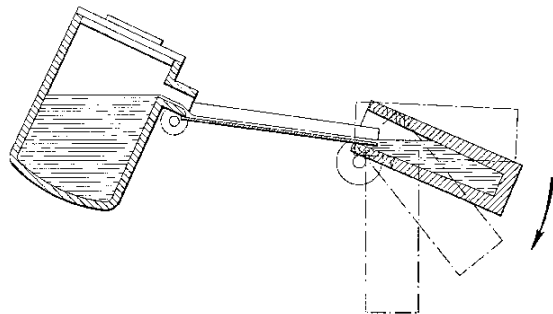
- Redução do ângulo de basculamento de  $180^\circ$  para  $90^\circ$ , com o plano de apartação na horizontal no início do basculamento.
- Velocidade de basculamento programada.
- O eixo de rotação, mantendo-se sempre paralelo ao plano de apartação, passou a localizar-se não necessariamente no limite da coquilha mas, eventualmente no seu baricentro.
- Automatização do processo, reduzindo a influência do operador e aumentando a reprodutibilidade do processo.



O “processo Durville” tem então as seguintes vantagens:

- Promover um enchimento suave, com pequenas alturas de queda do metal líquido ao longo de toda a fase de enchimento
- Aumentar o rendimento metalúrgico, por eliminação do sistema de enchimento, e da necessidade de gastar energia a fundir metal que, nos processos tradicionais, enche e solidifica no sistema de gitagem.
- A primeira vantagem tem que ver, naturalmente, com a forma da peça e a possibilidade de evitar, durante a rotação, que haja quedas de metal líquido de alturas elevadas.
- Com efeito, se a coquilha tiver sistema de gitagem mas este ficar vazio no fim do basculamento, quando a cavidade moldante estiver completamente cheia, o rendimento metalúrgico será o mesmo que seria se não houvesse canais de enchimento.

Na sequência do “processo Durville” foi desenvolvido um novo processo, denominada de “processo Semi-Durville”, que não é mais do que uma adaptação da lógica do funcionamento do processo que lhe deu origem, e é o método mais amplamente usado na produção de tarugos e lingotes ou billetes de bronze alumínio. A principal desvantagem do “processo Durville” reside no facto de serem necessários equipamentos volumosos e dispendiosos para permitir uma rotação do molde de 180°. A versão modificada permite superar este inconveniente, fazendo com que o metal flua, na mesma, de forma tranquila ultrapassando o problema económico e de espaço.



**Fig. 6 – Esquema de funcionamento do Processo Semi-Durville**

A figura 6 ilustra o princípio que está na base da modificação do processo original. Neste caso o molde é rodado 90° e o metal entra na cavidade através de um canal que provém de um forno, também ele rotativo. À medida que o metal desce pelo canal, forma um filme de óxidos, que se se tiver cuidado durante o processo permanece inquebrável. O nível de metal no interior da cavidade moldante continua a aumentar sem que seja necessário efectuar a rotação de qualquer dos aparelhos envolvidos no processo. Assim, a velocidade do metal é minimizada durante todas as etapas. [Magalhães, Processo Durville, 2003]

### 2.2.2.2 Processo Barbedo

Tendo em conta o que atrás foi referenciado, o Eng. A. Barbedo de Magalhães, decidiu desenvolver um processo que, promovendo o enchimento suave, por rotação da coquilha como no “processo Durville”, fosse de aplicação mais geral, por incluir sistema de gitagem adaptado às necessidades da peça e ao próprio processo de enchimento por rotação.

As características do processo desenvolvido no INEGI são as seguintes:

- O eixo de rotação da coquilhadora é perpendicular ao plano de apartação ou, se a apartação não for plana, é quase perpendicular à superfície de apartação (estando esta superfície sempre vertical ou quase vertical). Esta orientação facilita o enchimento suave, aproximando-se, por vezes e até certo ponto, do enchimento em nascente. A rotação será, geralmente, de cerca de  $180^\circ$ , dependendo da forma da peça e do número e localização dos alimentadores. Para reduzir a influência do fundidor e adaptar o sistema à forma das peças (eventualmente mais complexas), o ângulo de rotação pode atingir, nalguns casos, valores até cerca de  $180+90+45 = 315^\circ$  situando-se, normalmente, entre os  $90$  e os  $360^\circ$ . Para isso a coquilhadora deverá poder rodar  $360^\circ$  ou perto disso.
- A moldação tem um sistema de enchimento com um canal de gitagem em curva, projectado de forma que, ao rodar, a cavidade moldante se vai enchendo, ao mesmo tempo que se esvazia não apenas a bacia de vazamento mas também os próprios canais de enchimento. Como atrás foi referido, a existência deste sistema de gitagem torna possível a produção de peças de formas complexa, não apenas peças sem alimentadores ou com um alimentador, mas mesmo com mais alimentadores quando e aonde foram necessários. O enchimento pode ser suave e o rendimento do material fundido pode ser muito bom já que, no fim do enchimento, o sistema de gitagem estará vazio ou quase vazio.
- A alteração de orientação do eixo de rotação torna esta mais versátil, facilitando a sua extensão até aos  $360^\circ$  (uma rotação completa). O controlo das velocidades angulares, durante o enchimento, também se torna mais fácil.

A fim de ajudar os fundidores a definir a forma e as dimensões do sistema de enchimento (bacia de vazamento e canal ou canais de gitagem), o Eng. Joaquim Fonseca, desenvolveu um programa que permite visualizar a posição teórica da superfície livre do líquido para qualquer ângulo de rotação e para qualquer forma da peça e do sistema de alimentação e enchimento.

Este programa será utilizado como complemento a um programa de desenho tridimensional CAD 3D. Ele permitirá ao fundidor:

- Ver se a peça pode, ou não pode, encher de forma tranquila com rotação, dependendo da sua forma e eventuais quedas ou rápidos que esta provoca no metal durante o enchimento.
- Desenhar o sistema de enchimento de modo a conseguir um enchimento sem turbulência (enchimento tranquilo) e de forma a minimizar a quantidade de material vazado que permanece no sistema de gitagem no fim da rotação de enchimento.
- Este programa computacional, não exigindo um software de simulação mas apenas um programa de desenho CAD 3D, permitirá a pequenas fundições que não tiverem nem programa nem operador para simulação do enchimento, desenhar o sistema de gitagem a fim de definir o programa de rotação melhor adaptado a cada peça por simples observação da evolução da superfície de nível de modo a tornar o enchimento tão suave quanto possível.
- Para ser aplicável como complemento de um programa de CAD 3D, o programa desenvolvido no âmbito do projecto é extremamente simples e simplista. Com efeito, não é considerada nem a viscosidade do líquido nem a transferência de calor e eventual solidificação, parcial ou total, durante o enchimento. Este programa limita-se a determinar posições das superfícies livres, tendo em conta, apenas, o princípio dos vasos comunicantes.

Apesar dessa simplicidade, apenas a visualização pelo fundidor, da evolução das superfícies de nível com a rotação, diz-lhe se a forma da peça, por um lado, e a do sistema de enchimento por outro, fazem prever:

- Quedas de metal, no enchimento, de alturas superiores a um limite susceptível de provocar turbulências significativas e indesejáveis.
- Velocidades de avanço demasiado rápidas da frente livre e consequente necessidade de reduzir as velocidades de rotação nas zonas correspondentes e os efeitos que possam prever-se para esta redução de velocidade de rotação.

- Volume de metal que entra na cavidade da coquilha para cada posição angular desta (no quadro dos pressupostos simplistas atrás referidos).
- Quantidade de metal no sistema de enchimento no fim da rotação, a requerer redesenho do sistema ou alteração da posição angular ou do nível de metal líquido á partida (antes de começar a rotação da coquilha).

Aplicações a casos práticos:

Estas ideias, de que o INEGI requereu patente, tendo como autor o Eng. A. Barbedo de Magalhães, foram aplicadas á resolução de dois problemas concretos, um de uma fundição belga e outro de uma fundição portuguesa.

No que se refere a estas peças, uma fundição portuguesa tinha construído três coquilhas, correspondentes a três tamanhos diferentes de bombas de água. Mas as rejeições ou reclamações por falta de estanquicidade eram tantas, que as coquilhas foram postas de lado, passando as campânulas a ser produzidas por vazamento em areia, a um ritmo muito mais lento, com pior acabamento e mais caras. A melhoria de qualidade, quer superficial quer interior, é notável.

As alterações introduzidas nas coquilhas, feitas de acordo coma ideia patenteada pelo INEGI, permitiram reduzir substancialmente as rejeições, mesmo na fase experimental anterior ao estabelecimento de um regime regular reprodutível típico da produção continuada (em série) na fundição.

O sucesso alcançado fez pensar que o processo poderá ser aplicado a muitos outros casos.

Vantagens e desvantagens do processo Barbedo, em relação aos tradicionais processos de fundição em areia.

**Vantagens:**

- Eliminação da areia de moldação, e dos problemas relacionados com a sua obtenção, e com a eliminação da grande quantidade de resíduos de areia não (ou dificilmente) reciclável. Com efeito as restrições de exploração de areias são progressivamente maiores, e até Marrocos, com o seu deserto do Saara tem deficiências de areia, pois a terra seca do deserto não tem as propriedades adequadas. Além disso as escombeiras também elas tendem a ser cada vez mais distantes dos centros industriais.
- Maior produtividade por metro quadrado de instalação e por operário, e menor investimento inicial em instalações. A eliminação de todo um sistema de grandes dimensões para o armazenamento, preparação e transporte de areias de moldação, para o abate, arrefecimento e reciclagem, é a principal responsável pelas economias no investimento inicial em instalações, e pela maior produtividade por metro quadrado.
- Maior limpeza e melhor ambiente e consequente redução dos custos de aspiração, filtragem e remoção de poeiras. A maior limpeza da fundição torna-se hoje, e cada vez mais, um factor importante na captação e fixação de operários e técnicos qualificados, dela dependendo, em grande parte, a imagem da própria indústria de fundição.
- Maior precisão dimensional e melhor acabamento superficial das peças vazadas em coquilha, em comparação com as obtidas pelas técnicas tradicionais de vazamento em areia.
- Estruturas mais finas e compactas, conducentes a melhores propriedades mecânicas, em consequência do arrefecimento ser mais rápido do que em moldações em areia.
- Menores consumos energéticos relacionados com a eliminação do pesado sistema de transporte de areias de moldação, e com a redução da potência dos sistemas de despoeiramento e limpeza.
- Apesar de todas estas vantagens, o vazamento em moldações permanentes está longe de ser – ou até de se tornar – num sistema universal, porque também tem muitas limitações e inconvenientes. De seguida são destacadas as limitações mais importantes.

**Desvantagens:**

- A dificuldade, ou mesmo impossibilidade, de obter peças de formas complexas. Isto em resultado de problemas de apartação e contra-saídas insolúveis sem destruir a moldação após o vazamento, ou pelo elevado preço de maquinagem (ou, mais geralmente de fabricação) de coquilhas com formas muito complexas, além da própria dificuldade em as arrefecer. Há, hoje, uma certa tendência dos fabricantes em substituir conjuntos por peças fundidas de formas cada vez mais complexas. Esta primeira e fundamental limitação do vazamento em coquilha torna-o pouco apto a seguir a evolução referida.
- A limitação de tamanho das peças, relacionada com as dimensões (e custos) das coquilhadoras onde as moldações permanentes são montadas, para o seu posicionamento, abertura e fecho. As próprias potências a utilizar nestas máquinas, nomeadamente para a sua abertura, no caso de ocorrerem indesejáveis soldaduras da peça vazada à moldação permanente, também levantam algumas limitações ao processo, e à dimensão superficial máxima das peças a vazar.
- A lentidão do processo, já que, sendo permanente a moldação, é necessário aguardar pelo seu arrefecimento para se fazer novo vazamento. A produtividade depende, pois, de haver múltiplas coquilhas em simultâneo, e soluções multipostos em carrossel ou noutras disposições.
- A necessidade de um sistema eficiente de arrefecimento e de controlo de temperatura das coquilhas, não só para garantir uma cadência de vazamentos aceitável, mas também para controlar a estrutura das peças vazadas e as próprias temperaturas e duração das moldações permanentes.
- O elevado custo das coquilhas, relacionado com a complexidade das suas formas côncavas, com os materiais resistentes à fadiga térmica nelas empregues, nalguns casos, e com próprios circuitos internos de arrefecimento das coquilhas. O estudo e execução destes circuitos é relativamente caro e demorado, exigindo, por vezes afinações, que consomem tempo a pessoal qualificado.
- Tendo em conta o elevado custo das coquilhas, este deverá ser amortizado num grande número de peças. Isto significa que as coquilhas deverão ter uma longa duração, e as séries a produzir deverão ser grandes.
- A dificuldade e o elevado custo de eventuais modificações do sistema de alimentação e gitagem (caso se mostrem necessários). [Magalhães, Processo Durville, 2003]

### 2.2.3 Processo de Vazamento por Baixa Pressão

Neste processo, moldes permanentes são montados sobre um forno hermeticamente selado, um tubo liga a cavidade do molde e o metal líquido presente no forno. Ao pressurizar (entre 15-100 kPa, 2-15 psi) o forno, o metal é forçado a subir pelo tubo, directamente para o interior do molde. Quando o metal solidifica, a pressão é aliviada, o molde é aberto retirando-se a peça, ficando o molde pronto para um novo ciclo. A maior parte destes moldes são radialmente simétricos, mas moldes não simétricos também são



Fig. 7 – Molde de uma jante de automóvel

usados. Praticamente todas as jantes em liga de alumínio de automóveis (Fig. 7) são produzidas desta forma, mas também são produzidos blocos de motor, componentes para a indústria aeronáutica, caixas de motores eléctricos, painéis de pressão, torneiras, puxadores, etc. A figura 8 representa um esquema simplificado do processo de baixa pressão, enquanto que na figura 9 são identificados todos os constituintes do mesmo processo.

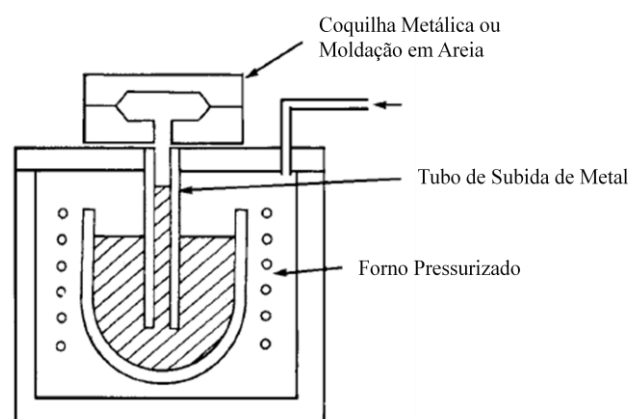
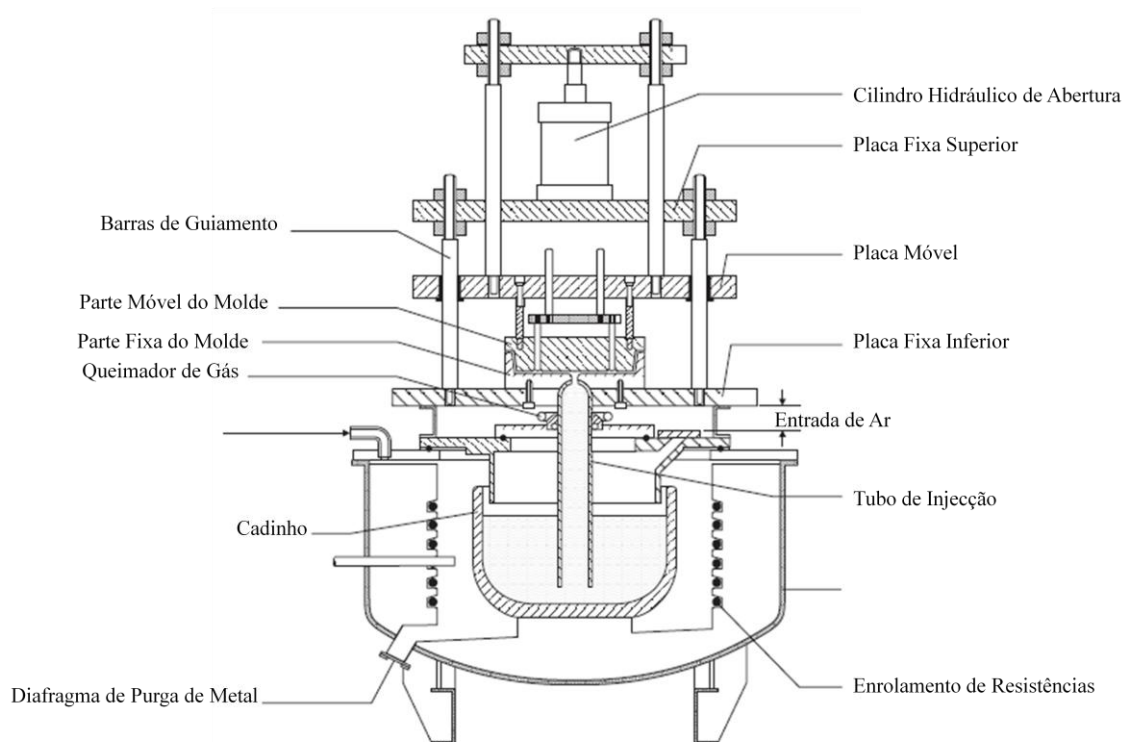


Fig. 8 – Esquema demonstrativo do processo de baixa pressão

Este processo é capaz de produzir peças de elevada qualidade e muito boas propriedades mecânicas. Se a moldação for bem projectada, a direcção de solidificação ficará bem definida, deixando de ser necessário recorrer a alimentadores. Como normalmente existe apenas um ataque, o rendimento atingido é bastante elevado, geralmente acima dos 90%. Este processo permite obter uma boa precisão dimensional, um bom acabamento superficial e possibilita também a obtenção de peças de formas complexas. Peças até 150 kg (Alumínio) são passíveis de serem obtidas por este processo, mas essa opção só será tomada em casos muito especiais, uma vez que a coquilha necessária para a obtenção da peça é bastante dispendiosa. A capacidade do forno dá para produzir em média cerca de 10 peças, antes de voltar a ser abastecida de metal.

As ligas comumente utilizadas neste processo são: AlSi5Cu3 (LM4, US319), AlSi12 (LM6, US413), AlSi7Mg (LM25, US A356). Obviamente são alvo de tratamento de degasificação, refinamento de grão e modificação estrutural, temas a serem abordados posteriormente neste trabalho.



**Fig. 9 – Identificação dos componentes envolvidos num sistema de baixa pressão**



Existem vários parâmetros que controlam este processo, (a) a velocidade a que a pressão é aplicada, (b) a pressão, que se torna praticamente irrelevante uma vez iniciado o processo de solidificação e (c) os gradientes térmicos, que são essenciais uma vez que estabelecem a direcção de solidificação. Como em todas as moldações permanentes, estes gradientes são estabelecidos de acordo com a espessura das paredes das peças e pelo modo de arrefecimento selectivo das mesmas.

Como praticamente todas as moldações por baixa pressão têm apenas uma entrada de metal e não são necessários alimentadores para compensar a contracção no estado líquido, o peso bruto é reduzido e as operações de acabamento são minimizadas.

Quando a temperatura do forno está ligeiramente acima do ponto de fusão da liga a ser utilizada, é vazado metal líquido no interior do forno que é depois selado. Quando a temperatura estabilizar á volta do valor pretendido e a coquilha (fechada) é pré-aquecida até ao valor de funcionamento (250- 400°C), a válvula de entrada de ar de baixa pressão é aberta, fazendo com que ar seco entre no forno obrigando o metal a fluir pelo tubo entrando na cavidade da moldação. Com o forno ainda sob pressão, o metal solidifica rapidamente. Uma vez que a sequência está determinada e estabilizada, esta pode ser controlada automaticamente usando controladores, permitindo assim ter apenas um operador a monitorizar todo o processo.

O tempo de ciclo (aproximadamente 9-10 vazamentos por hora – semelhante ao tempo de ciclo do vazamento por gravidade) é ditado pela solidificação do metal na intersecção do tubo de alimentação com a cavidade do molde. Enquanto o metal em contra gravidade flui para o interior do molde de forma suave, para permitir que o ar se escape pelos escapes, o processo apresenta um risco reduzido de contaminação por inclusões. Quando o molde é aberto e a peça é retirada, o selo criado por vácuo na interface líquido-sólido é quebrado e o metal líquido que ainda permanece no tubo cai de novo no banho. O fluxo repetido de metal no tubo pode resultar na formação de óxidos nas faces internas do tubo, independentemente se o tubo é cerâmico ou metálico. Para minimizar este problema, uma contra-pressão pode ser mantida de forma a impedir que o metal volte de novo para o banho. Proceda-se também á filtragem do metal, colocando filtros de rede de aço, coadores cerâmicos ou cerâmicos esponjosos.

As coquilhas devem ter uma construção sólida e são normalmente feitas em ferro fundido. Zonas onde se verifica um maior desgaste, machos retrácteis e áreas onde se existem concentrações de temperatura elevadas são feitas em aço H13, ou num aço de ferramentas equivalente. O tipo de construção das coquilhas é semelhante ao das coquilhas utilizadas em fundição injectada de forma garantir a fiabilidade das operações. O balanço térmico das coquilhas tem que ser cuidadosamente avaliado uma vez que o arrefecimento se deve dar das extremidades da coquilha para o ponto onde está localizado o tubo por onde o metal flui, de forma a garantir que defeitos de contracção e outros não surgem nas peças obtidas. Este é provavelmente o aspecto mais difícil deste processo, pelo que uma cooperação entre o fabricante da coquilha e a fundição é necessária para garantir o perfeito funcionamento e sucesso do processo. Raramente uma coquilha nova opera correctamente pelo que é



Fig. 10 – Máquina do sistema de baixa pressão

necessário um longo período de teste e modificações até esta atingir a máxima eficiência. As coquilhas devem ser revestidas correctamente para evitar que o metal adira á moldação e para controlar também o gradiente de temperaturas de extracção. O revestimento das coquilhas utilizado é semelhante ao utilizado no processo de vazamento por gravidade. A espessura do revestimento varia desde muito fino, em áreas onde se pretende um arrefecimento mais rápido, até espessuras elevadas, em áreas onde a peça terá espessuras muito finas. O revestimento é normalmente aplicado em spray quando a coquilha está a uma temperatura de 120-200 °C, para que o revestimento seque rapidamente. A coquilha é reaquecida acima da temperatura de funcionamento antes da entrada do metal na cavidade. A frequência com que o

revestimento é retocado ou reaplicado varia consoante o tipo de material, com as temperaturas, etc.

O objectivo é que o revestimento seja aplicado no início de cada turno. Como acontece noutros processos em que é necessário revestir moldação, deve-se limpar a coquilha cuidadosamente e periodicamente, cerca de uma vez por semana. A vida útil da coquilha ronda os 30000-50000 vazamentos.

Este processo conhece duas variantes. Numa delas o metal é vazado no interior da cavidade não através da aplicação de uma maior pressão na câmara que contem o cadinho, mas através da diminuição da pressão na cavidade de moldação pela criação de vácuo. Este processo, denominado vazamento sob vácuo, é em tudo o resto semelhante ao processo de vazamento sob baixa pressão.

A segunda variante denomina-se método de *Griffin* de vazamento em moldações permanentes de grafite, por ter sido desenvolvido pela “ *Griffin Wheel Company of Chicago*”. Esta empresa produzia rodas para comboios, um produto cujos requisitos em termos de propriedades mecânicas eram muito elevados. A elevada temperatura de fusão do aço, material de que elas eram constituídas, tornava as moldações permanentes metálicas pouco apropriadas. Os técnicos daquela empresa experimentaram então a utilização de moldes em grafite, dadas as características de condutividade térmica, rigidez e dilatação/contracção deste material. Após verificarem que as moldações eram erodidas muito rapidamente pelo vazamento do aço líquido, o vazamento sob baixa pressão foi utilizado com coquilha de grafite, chegando-se àquilo que é hoje o método de Griffin: essencialmente um método de vazamento em moldações permanentes de grafite por baixa pressão. [Alonso, 1972] [Ferreira, 1999] [Brown, Foseco Non-Ferrous Foundryman’s Handbook, 2000]

Resumidamente o processo de baixa pressão, na sua generalidade, apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

### **Vantagens**

- Obtêm-se peças com boas propriedades mecânicas
- Bom acabamento superficial e estrutura interior
- Permite a realização de peças que não se conseguem obter utilizando o processo de pressão injectada

- Possibilidade de obtenção de secções mais finas do que no vazamento por gravidade
- Elevado rendimento na utilização do metal fundido
- Permite a reutilização dos moldes
- Taxa de produção extremamente rápida e com formação de escória praticamente nula
- Redução do custo de maquinagem com a remoção dos canais de alimentação e gitagem

### **Desvantagens**

- Devido ao elevado valor das ferramentas necessárias, este processo requer taxas de produção extremamente elevadas
- Limitado à realização de peças de pequenas dimensões, apesar de já se começar a realizar algumas peças de maiores dimensões, tais como blocos de motor
- Custos de manutenção do sistema de alimentação da moldação (desde o cadinho até à moldação propriamente dita)
- Dificuldade de acesso ao metal armazenado no cadinho (para inspecção ou tratamento, por exemplo) e necessidade de interrupção do processo para o seu reabastecimento
- Apesar de outros metais poderem ser fundidos usando este processo, ele está praticamente limitado à utilização de ligas leve

## **2.2.4 Materiais Tradicionalmente Usados na Construção de Coquilhas**

As coquilhas estão sujeitas a condições de trabalho relativamente severas, principalmente em resultado das flutuações térmicas a que estão sujeitas durante o ciclo de vazamento, solidificação, arrefecimento das peças (e aquecimento das coquilhas), extracção, arrefecimento e revestimento das coquilhas e novo vazamento. Essas condições são tanto mais severas quanto mais altas forem as temperaturas de fusão das ligas vazadas, motivo pelo qual são principalmente as ligas de baixo ou médio ponto de fusão – ligas de zinco, alumínio e magnésio – ou de ponto de fusão moderadamente elevado – ligas de cobre – as mais vazadas em moldações permanentes.

Também os ferros fundidos podem ser vazados em coquilhas, apesar dos problemas relacionados com o seu ponto de fusão elevado e com os riscos de têmpera ledeburítica. A tecnologia de vazamento em coquilha de ferros fundidos tem sido, até agora, muito mais utilizada e desenvolvida nos países do leste europeu do que nos países ocidentais.

Além das solicitações termo-mecânicas, as coquilhas estão sujeitas à oxidação, às temperaturas de trabalho, à erosão provocada pela passagem da corrente líquida durante o vazamento e enchimento da moldação, à eventual dissolução do material da coquilha pelo metal líquido vazado, às reacções com as escórias com que possa entrar em contacto, à corrosão a quente em contacto com a atmosfera, a água ou outros líquidos de aplicação dos revestimentos, etc. Todos estes factores têm que ser tidos em conta na escolha dos materiais das coquilhas. Estes devem, além disso, proporcionar arrefecimentos suficientemente rápidos para os ciclos de vazamento não serem muito longos e, nalguns casos, suficientemente lentos para evitarem estruturas de têmpera, tais como a ledeburite dos ferros fundidos que se pretendem grafíticos.

Em todos os casos o arrefecimento também não pode ser de tal modo rápido que determine a solidificação de zonas de passagem do metal antes da moldação estar completamente cheia. A adaptação da condutibilidade térmica e da capacidade térmica da coquilha, bem como da sua temperatura, à espessura das peças a vazar é, pois, um aspecto essencial a considerar na fabricação das coquilhas. Os revestimentos destas poderão desempenhar um papel importante no controlo desse factor.

Os materiais das coquilhas devem ter dureza e resistência suficientes para permitir o fácil manuseamento sem se estragarem. Se forem reparáveis (geralmente por soldadura ou técnicas afins) a sua vida poderá ser estendida, sem necessidade de fabricação de novas coquilhas.

Além disso é fundamental que mantenham a estabilidade estrutural e dimensional, durante os ciclos térmicos de trabalho. Transformações metalúrgicas envolvendo variações volumétricas implicam empenos das moldações, além do que podem contribuir para a fissuração das coquilhas, reduzindo o seu tempo de vida útil.

Os materiais tradicionalmente empregues na construção de coquilhas são, principalmente:

- Ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos nodulares
- Aços de baixo carbono e aços refractários (nomeadamente ligados ao Crómio)
- Cupro-berílios e outras ligas de cobre

Para o vazamento de aços (nomeadamente para a produção de jantes), e de peças em bronze (buchas, mancais, etc.), é frequente utilizarem-se moldações permanentes de grafite. Esta garante um arrefecimento muito rápido. O principal inconveniente da grafite é começar a oxidar-se ao ar a partir de temperaturas da ordem do 400° C a 480° C. Para reduzir essa oxidação e aumentar a vida das coquilhas em grafite usa-se revesti-las com silicato de etilo ou com sílica coloidal. Para diminuir a erosão da grafite é frequente utilizar velocidades de enchimento lentas, embora compatíveis com o rápido arrefecimento promovido pela grafite.

Nalguns casos as próprias ligas de alumínio podem ser utilizadas na fabricação de coquilhas. A anodização ou revestimentos adequados protegem então as coquilhas do contacto com as ligas vazadas, impedindo o seu excessivo aquecimento superficial.

Para a fabricação de machos e de algumas partes críticas, mais solicitadas termicamente ou sujeitas a erosão, pode-se recorrer a ligas de muito alto ponto de fusão, à base de tungsténio ou de molibdénio. A fabricação de peças nessas ligas exige, geralmente, o recurso a técnicas de pulvero-metalurgia

Tabela 1 – Materiais recomendados para moldações permanentes

	Número de peças a vaziar		
Liga Vazada	1000	10000	100000
a) Para pequenas peças cuja máxima dimensão não exceda os 25mm			
Zinco	Ferro Fundido Cinzento (FFC); Aço 1020		
Alumínio; Magnésio	Ferro Fundido Cinzento; Aço 1020		FFC c/insertos AISI H14; Aço 1020
Cobre	FFC	FFC	FFC ligado
Ferro Fundido Cinzento	FFC com mesma composição do ferro fundido vazado		_____
b) Para peças cuja máxima dimensão seja maior que 25mm e menor que 915mm			
Zinco	FFC; AISI H11	FFC; AISI H11	FFC; AISI H11
Alumínio; Magnésio	FFC	FFC	FFC ; AISI H11 ou H14
Cobre	FFC ligado	FFC ligado	FFC ligado
Ferro Fundido Cinzento	FFC com mesma composição do ferro fundido vazado		_____

Tabela 2 - Materiais recomendados para pequenos machos ( $\emptyset < 75\text{mm}$ ,  $L < 250\text{mm}$ ) para vazamento em coquilha

Liga Vazada	Materiais para Machos
Zinco	Aço, Gesso, Ferro Fundido Cinzento, Aço 1020
Alumínio; Magnésio	Aço 1010 ou 1020, Areia, Gesso, Aço H11, Carbono
Cobre	Areia, Aço 1020, FFC, Gesso, Grafite
Ferro Fundido Cinzento	Areia, Grafite, Carbono, FFC

De notar que no quadro acima, os materiais estão indicados por ordem decrescente de preferência. O carbono, gráfico ou não, usa-se apenas para a produção de um reduzido número de peças. O gesso é preferível em machos, para peças a vazar em bronze, de alumínio.

Tabela 3 - Materiais recomendados para machos de grandes dimensões ( $\varnothing > 75\text{mm}$ ,  $L > 250\text{mm}$ ) para vazamento em coquilha

Liga Vazada	Números de peças a vazar		
	1000	10000	100000
Zinco	FFC, Aço 1020	FFC, Aço 1020	FFC, Aço 1020
Alumínio; Magnésio	FFC c/ insertos em Aço 1020, Areia, Gesso	FFC c/ insertos em Aço 1020 ou H11, Areia, Gesso	FFC c/ insertos em H11, Aço H11 para Coquilhas
Cobre	Areia	Areia	—
Ferro Fundido Cinzento	Areia, Grafite, Carbono, FFC	Areia, Grafite, Carbono, FFC	—

Os machos em areia podem ter como ligantes óleos, resinas,  $\text{CO}_2$  – silicato, ou ser obtidos por shell – coring.

O vazamento de ferros fundidos em coquilha, embora pouco utilizados nos países ocidentais, tem uma longa tradição. Desde que, a partir de 1650, se começaram a fazer moldações metálicas, começaram a ser produzidas por esse processo muitas balas de canhão. No século XIX começou a produção de tubos em ferro fundido por fundição centrifugada em moldações permanentes. E desde 1925 começaram-se a produzir, por este processo, pequenas peças em ferro fundido cinzento para a indústria automóvel. A estrutura ferrítica resultava, em parte, da presença de grafite muito fina de sobrefusão e, em parte, do tratamento térmico para a eliminação dos carbonetos de solidificação que normalmente surgiam em consequência dos rápidos arrefecimentos provocados pelas coquilhas. [Magalhães, Fundição em Coquilha, 1989]



### 2.2.5 Tensões de Origem Térmica em Coquilhas

O desenvolvimento da tecnologia de vazamento em coquilhas, cujas vantagens já foram referidas anteriormente, e a sua generalização às ligas de alto ponto de fusão (ferros fundidos, aços, ligas de titânio, etc.), está condicionado à possibilidade de se fabricarem coquilhas mais baratas ou eventualmente mais duráveis.

Isso depende de dois factores:

- Da simplicidade e baixo custo de fabricação das coquilhas
- Do comportamento em serviço dos materiais empregues na sua construção

O comportamento destes últimos está relacionado com factores que foram referidos anteriormente. Dentre estes, avulta o comportamento à fadiga térmica, motivo pelo qual as tensões de origem térmica e as formas de as reduzir merecem uma especial atenção.

Estas tensões ( $\sigma$ ) dependem de eventuais diferenças de temperatura ( $\Delta T$ ) ou de coeficientes de dilatação linear ( $\alpha$ ) de materiais, dentro de uma mesma estrutura. Elas dependem também de constrictões exteriores, de uma forma que nem sempre é tida em linha de conta.

As figuras 11, 12 e 13 mostram a influência das constrictões exteriores, em uma, duas e três direcções, no valor máximo da tensão de origem térmica correspondente a um incremento  $\Delta T$  da temperatura, em relação a uma temperatura de equilíbrio (em que  $\sigma$  seria igual a zero).

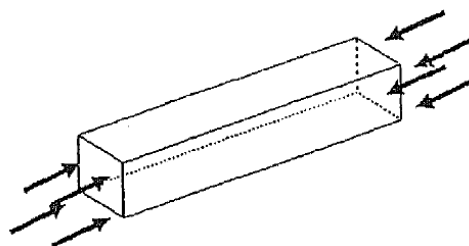


Fig. 11 – Deslocamento restricto a zero numa direcção

$$\sigma_{Max,1d} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

E representa o módulo de elasticidade longitudinal (módulo de Young) e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

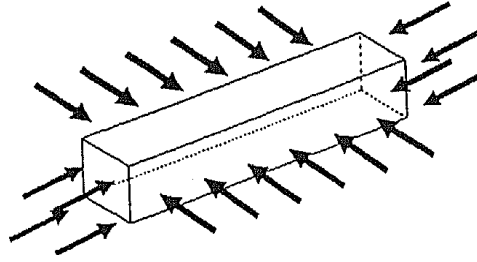


Fig. 12 – Deslocamento restrito a zero em duas direcções

$$\sigma_{Max,2d} = \frac{E.\alpha.\Delta T}{1-\nu} \quad (2)$$

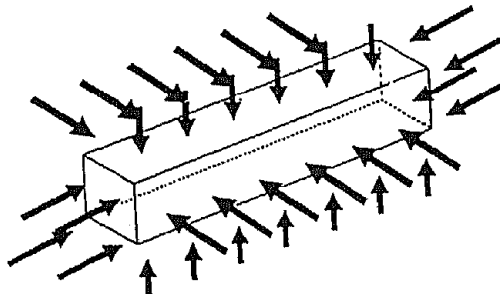


Fig. 13 – Deslocamento restrito a zero em três direcções

$$\sigma_{Max,2d} = \frac{E.\alpha.\Delta T}{1-2\nu} \quad (3)$$

Se o coeficiente de Poisson tiver o valor de  $\nu = 0.33$ , resulta:

$$\sigma_{M\acute{a}x, 3d} = 3 \sigma_{M\acute{a}x, 1d} \quad (4)$$

Isto mostra que as próprias condições de fixação de uma peça na estrutura rígida influenciam o valor das tensões térmicas correspondentes a um dado  $\Delta T$ .

Mas o próprio valor de  $\Delta T$ , ao qual é proporcional a tensão máxima, deve ser considerado com cuidado.

Que valor deve ser considerado para  $\Delta T$ ?

Será a máxima diferença de temperaturas entre o ponto mais quente e o ponto mais frio da coquilha?

Será a diferença entre o valor médio das temperaturas da coquilha e a temperatura da estrutura (coquilhadora) em que esta foi fixada?

Ou será que a tensão máxima,  $\sigma_{M\acute{a}x}$ , depende da diferença de temperaturas entre o ponto mais quente da coquilha e a temperatura (média) da estrutura (coquilhadora) onde esta está montada?

Pelo que foi referido anteriormente, parece que a tensão máxima depende desta última diferença de temperaturas, desde que a coquilha esteja rigidamente ligada à estrutura. Consoante essa ligação seja rígida segundo uma, duas ou três direcções independentes do espaço, assim devem ser utilizadas as formas de cálculo (1), (2) e (3), respectivamente.

Nestas circunstâncias é caso para perguntar se há algum processo de reduzir a tensão máxima que não seja diminuir a diferença de temperaturas entre o ponto mais quente da coquilha e a estrutura de suporte e amarração desta.

Na ausência de qualquer constrição exterior, uma coquilha com a face de trabalho mais quente do que a face oposta tenderia a curvar, como mostra a figura 14.

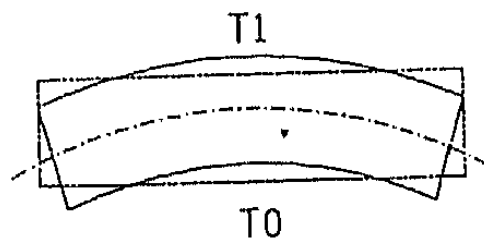


Fig. 14 – Encurvadura de uma barra sujeita a um gradiente térmico. Se a distribuição da temperatura ao longo da barra for linear, não há tensões térmicas

Esta situação é inaceitável em fundição. Uma coquilha empenada torna-se impossível de encher com metal líquido, uma vez que as duas partes que normalmente a compõem deixam de encostar uma à outra, a não ser num ponto central. A manutenção da geometria (normalmente plana) da superfície de apartação é imprescindível, e isso consegue-se à custa da aplicação de tensões compressivas numa das faces e tractivas na outra, com um momento flector que contrarie a encurvadura de origem térmica.

Se se fixar a coquilha na coquilhadora de forma a impedir, apenas, o seu encurvamento ou empeno (com um único ponto central de fixação), e se for linear a distribuição de temperaturas (dT) nesta (suposta barra linear – 1d), a tensão máxima será:

$$\sigma_{\text{Máx, não-encurv., dT, 1d}} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot 1/2 \text{ (barra linear) (5)}$$

Tratando-se (como normalmente é o caso) de uma coquilha de geometria próxima da de uma placa, teremos:

$$\sigma_{\text{Máx, não-encurv., dT, 2d}} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot 1/2 \cdot (1-\nu) \text{ (5*)}$$

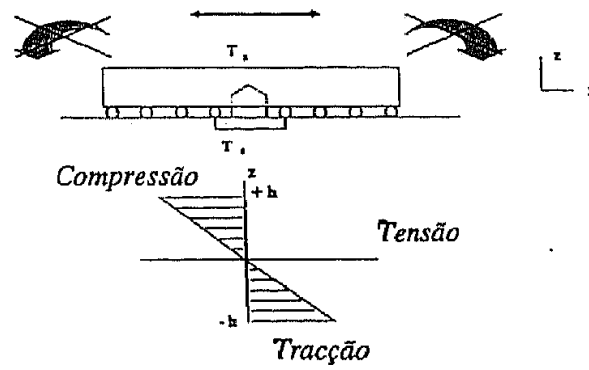


Fig. 15 – Tensões térmicas devido a uma distribuição linear de temperaturas (dT) quando o encurvamento é impedido

Se se comparar a expressão (2) com a expressão (5\*) concluímos que o simples facto de modificarmos a forma de fixação da coquilha (que passou a ter apenas um ponto central de fixação que a impede de empenar) a máxima tensão passou a ser metade do que era numa fixação rígida bidimensionalmente.

Se a distribuição de temperaturas ao longo da espessura não for linear (ndIT), a tensão máxima passa, naturalmente, a ser dada pelas expressões (5) e (5\*) que substituem as anteriores (4) e (4\*):

$$\sigma_{\text{Máx, não-encurv., ndIT, 1d}} = E \cdot \alpha \cdot (T_{\text{Máx}} - T_{\text{Fibra Neutra}}) \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{Máx, não-encurv., ndIT, 2d}} = E \cdot \alpha \cdot (T_{\text{Máx}} - T_{\text{Fibra Neutra}}) / (1-\nu) \quad (5^*)$$

A figura 16 representa as duas situações.

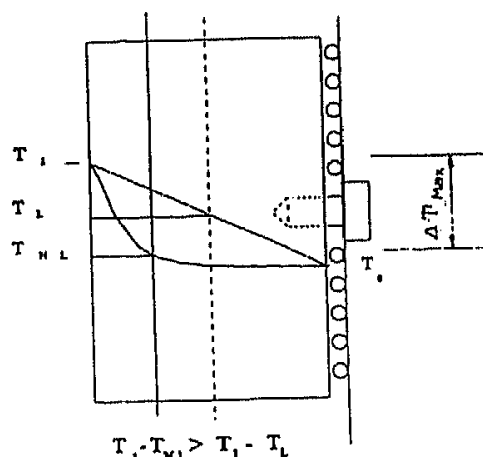


Fig. 16 – A máxima tensão térmica devida a uma distribuição não linear das temperaturas numa coquilha livre de escorregar no prato de uma coquilhadora é proporcional a:  $\Delta T_{\text{Máx}} = T_{\text{Máx}} - T_{\text{FN}}$ , onde  $T_{\text{Máx}}$  é a temperatura de face quente e  $T_{\text{FN}}$  é a temperatura de fibra neutra (isenta de tensões térmicas)

Se compararmos os valores das tensões em duas coquilhas fixadas de formas diferentes, e supondo que a temperatura máxima da coquilha é  $T_{Máx} = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , que a temperatura da sua fibra neutra é  $T_{FN} = 320 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , e que a temperatura da estrutura é de  $T_{Estr} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , teremos:

Coquilha rigidamente fixada em duas direcções:

$$\sigma_{Máx, 2d} = E.\alpha. (600 - 40) / 0.67$$

Coquilha livre de escorregar, e apenas impedida de empenar:

$$\sigma_{Máx, não-encurv.} = E.\alpha. (600 - 320) / 0.67 = \sigma_{Máx, 2d} / 2$$

Isto significa que há basicamente dois processos de diminuir a máxima tensão de origem térmica numa coquilha:

Uma é diminuir o valor do produto de  $E.\alpha$ , escolhendo materiais com um baixo coeficiente de dilatação linear ou um baixo módulo de Young, ou ambos.

Outra é diminuir  $\Delta T_{Máx} = T_{Máx} - T_{FN}$ , onde  $T_{FN}$  é a temperatura da fibra neutra da meia coquilha, ou a temperatura da estrutura de fixação desta, ou seja, é a temperatura da zona ou parte que define ou impõem a dimensão real da coquilha.

Existem outros processos, que estão esquematizados nas figuras seguintes:

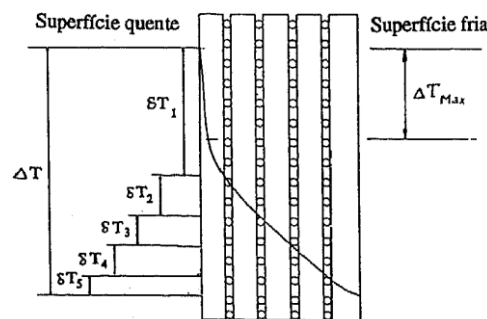


Fig. 17 – Esquema para reduzir as tensões térmicas diminuindo  $\Delta T_{Máx}$

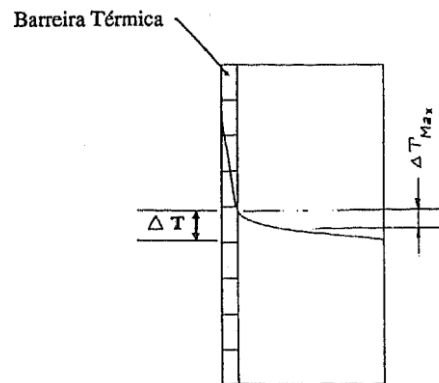


Fig. 18 – Efeito de uma barreira térmica na redução de  $\Delta T_{Máx}$

A figura 17 tem um interesse meramente teórico, visto que dificilmente se pode fabricar uma coquilha em fatias.

Ela mostra, no entanto, que se for possível fazer uma coquilha fina, (dependente da espessura das peças a vazar), ainda que esta tenha que ter, depois, uma placa de arrefecimento a ela justaposta, esta solução é melhor do que a de ter uma coquilha muito espessa, com um elevado gradiente de temperaturas entra a face mais quente e a face mais fria.

A figura 18 mostra que se for possível revestir a coquilha com um revestimento bem aderente ao substrato mas sem resistência mecânica intrínseca ou finamente fissurado nas direcções da superfície, o gradiente térmico que efectivamente conta para efeitos de tensões criadas é apenas o que se verifica no substrato. Se a barreira térmica for eficiente, a máxima tensão térmica pode-se tornar muito menor do que seria sem barreira térmica.

Esta última consideração mostra claramente a importância das barreiras térmicas em coquilhas. Uma boa barreira térmica, bem aderente e sem resistência mecânica intrínseca, permitiria quase utilizar um material qualquer no substrato, dado que as temperaturas e as tensões térmicas viriam fortemente diminuídas. A dificuldade principal é conseguir uma boa aderência ao substrato, para que o próprio revestimento tenha uma longa duração. [Magalhães, Fundição em Coquilha, 1989]

## 2.3 Sistemas de Refrigeração

A temperatura das coquilhas, imediatamente antes de cada vazamento, é um factor fundamental.

Dela vai depender, com efeito:

- A velocidade de arrefecimento do metal vazado e a eficiência do enchimento e da própria alimentação (se ela existir) e, portanto, a própria sanidade das peças.
- A estrutura e propriedades das peças vazadas
- A duração do ciclo de vazamento
- A temperatura máxima atingida pela coquilha e o seu tempo de vida útil

Dáí que seja extremamente importante manter constante a temperatura (mínima) das coquilhas imediatamente antes de cada vazamento. No caso de se vazarem peças em ferro fundido em coquilhas também de ferro fundido, é habitual trabalhar com coquilhas a cerca de 300 a 350 °C imediatamente antes de cada vazamento, se as peças forem finas ou de espessura média. Em peças de grande espessura as temperaturas (mínimas) das coquilhas devem baixar, podendo chegar aos 100 °C.

Para assegurar a constância desses valores de temperatura, em sucessivos vazamentos, e utilizando os sistemas convencionais de arrefecimento de coquilhas, é necessário manter constantes:

- A temperatura de vazamento
- O tempo de manutenção da peça na coquilha
- O tempo de arrefecimento da coquilha

A mecanização do vazamento em coquilha deverá ter em conta estes factores, sob pena das propriedades físicas e mecânicas das peças vazadas não corresponderem às exigências do cliente.

Arrefecimento normal – Utilizado apenas em coquilhas estática, em coquilhas só com uma face de forma e assentes em mancais ou em coquilhas de charneira, quando o tempo de arrefecimento seja irrelevante para efeitos de produção.

Arrefecimento natural acelerado – a forma nervurada ou com protuberâncias cilíndricas ou cónicas da face exterior da coquilha permite aumentar 25% ou mais a velocidade de arrefecimento.

Arrefecimento por ar forçado – Criando uma caixa-de-ar na face posterior da coquilha, e forçando a sua entrada por um orifício (normalmente na parte superior das coquilhas) e a sua saída no extremo oposto, pode-se aumentar a velocidade de arrefecimento de forma significativa. Variando o débito de ar é possível alterar a velocidade de arrefecimento das coquilhas.

Arrefecimento por escoamento de água – Fazendo incidir um chuveiro e deixando escoar a água assim projectada sobre a face posterior das coquilhas, eliminando-a pela parte inferior, consegue-se um arrefecimento muito mais intenso. A colocação de nervuras ou protuberâncias na coquilha aumenta a velocidade de arrefecimento e torna possível uma certa adaptação desta à espessura local das peças vazadas, e portanto ao calor absorvido localmente durante o vazamento e solidificação.

Arrefecimento por canais incorporados nas coquilhas – É um sistema que encarece muito as coquilhas. Além disso não pode ser utilizado em moldações permanentes de ferro fundido, porque uma eventual fissuração, por onde a água sob pressão penetrasse até à face de trabalho, poderia dar origem a violentas explosões aquando do vazamento. Este sistema tem, no entanto, a vantagem de permitir um arrefecimento controlado da coquilha, em função da espessura local das peças vazadas. Além disso, desde que os circuitos de água estejam bem desenhados e disponham de um conjunto de termopares, torna possível a adaptação dos caudais de água de arrefecimento às condições reais da coquilha no final de cada vazamento.

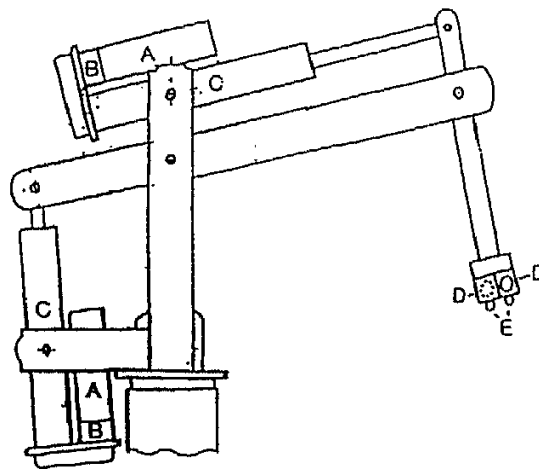
Arrefecimento líquido posterior directo – Neste caso a face posterior da coquilha funciona de tampa de uma caixa cheia de um líquido de arrefecimento: água, óleo ou uma emulsão. O líquido arrefecedor é bombeado para essa caixa, dependendo da velocidade de arrefecimento do caudal circulante. Para tornar o arrefecimento mais eficaz a coquilha deverá ter uma parede fina, e ser feita num material bom condutor, tal como as ligas de cobre, de alumínio (anodizado) ou de aço. Por questões de segurança a coquilha nunca pode ser feita em ferro fundido.

Todos estes sistemas de arrefecimento ou são pouco eficientes, ou são pouco flexíveis e pouco adaptativos às condições locais de temperatura (em função da variação de espessuras das peças e das condições reais de cada vazamento), ou são demasiado caros. Além disso os mais eficientes condicionam os materiais das coquilhas e a sua própria técnica de construção, uma vez que é fundamental evitar as penetrações de água ou outros líquidos arrefecedores.



O desenvolvimento da tecnologia de vazamento em coquilha e a sua generalização a ligas de alto de fusão (ligas ferrosas, nomeadamente) exige que se considerem outros materiais e técnicas de fabricação de coquilhas. Mas para isso é preciso ultrapassar os presentes condicionalismos relativos ao arrefecimento e controlo das temperaturas de coquilhas. Foi com esse objectivo que, no âmbito do projecto FECAUDI, se desenhou e executou um sistema original de arrefecimento e controlo de temperaturas de coquilhas (Fig. 19), do qual foi requerido patente nacional e europeia.

Neste sistema o arrefecimento é feito, total ou parcialmente, pelas faces de trabalho das meias coquilhas, por meio de um par de jactos de ar ou de ar contendo pequenas quantidades de água. Os jactos são dirigidos para os pontos mais quentes da coquilha, normalmente correspondentes a zonas de maior espessura das peças ou do sistema de alimentação e gitagem. A determinação dos pontos mais quentes é feita por meio de pirómetros ópticos de leitura rápida (menos de um milésimo de segundo por leitura). Para esse efeito foi construído um manipulador, onde foram montados um par de pirómetros ópticos e um par de tubeiras para o jacto de ar ou de misturas ar – água.



**Fig. 19 – Manipulador para varrer as superfícies das coquilhas, lendo as temperaturas e arrefecendo-as por sopragem de ar ou mistura ar-água**

A – Servomotor

D – Pirómetro Óptico

B – Redutor planetário

E – Tubeira de Sopragem (para arrefecimento)

C – Sem-fim de esferas

Depois de um varrimento rápido inicial das coquilhas, para elaboração dos mapas de temperaturas, um programa especial computacional dirige os jactos de ar ou de misturas de ar – água para as zonas mais quentes. Durante o arrefecimento os pirómetros ópticos continuam a ler temperaturas adaptando os caudais e os tempos de arrefecimento às condições locais em cada vazamento.

Este sistema é de extrema flexibilidade e auto-adaptativo. Com ele dispensam-se os canais interiores de arrefecimento ou outros sistemas que exijam um estudo caso a caso.

Se a espessura das peças a vazar o justificar, o arrefecimento das coquilhas pode-se fazer em parte pelo lado posterior, por meio de placas standard em cobre, arrefecidas a água. A adaptação ao desenho real de cada coquilha e às condições de vazamento em cada momento (atendendo a eventuais flutuações da temperatura do metal a vazar, tempos de espera entre vazamentos, etc.), será feita pelo sistema de leitura óptica de temperaturas e aplicação do fluído de arrefecimento.

O arrefecimento pela face de trabalho levanta problemas de choque térmico suplementares, sobretudo quando o jacto contiver água, embora esta forme uma nuvem de gotículas de pequenas dimensões, que se evaporarão rapidamente em contacto com a face quente da coquilha. Esta poderá ser uma razão para limitar o arrefecimento, nessa face, à correcção das temperaturas conseguidas por uma placa standard posterior. Outra alternativa é seleccionar ou desenvolver materiais ou revestimentos resistentes ao choque térmico. Um revestimento fissurado transversalmente, desde o início, poderá ser uma boa solução se tiver uma boa aderência ao substrato.

A eficiência do arrefecimento pela face anterior pode ser evidenciada pela tabela n.º x, onde se indica a eficiência da transferência de calor de diversos meios (segundo J.P. Holman – Heat Transfer).

Tabela 4 - Coeficientes de transferência de calor em diversas

Coeficiente de Transferência de Calor, h	h
Processo de Transferência	W/m <sup>2</sup> .°C
• Convecção natural, T = 30°C, placa vertical plana de altura, ao ar	4,5
• Radiação de uma placa metálica a 425°C (400°C acima da temperatura ambiente)	10
• Convecção forçada	
- Ar a 2m/s sobre uma placa quadrada de 0.2m	12
- Ar a 35m/s sobre uma placa quadrada de 0.75m	75
- Ar circulando num tubo com Ø 5cm a 50m/s	180
• Água circulando num tubo com Ø 2,5cm com um caudal de 0,5Kg/s (~1m/s)	3,500
• Vaporização (ebulição) de água:	
- Num recipiente	2,500 a 35,000
- Circulando num tubo	5,000 a 100,000

A tabela mostra que a água é um meio de arrefecimento muito eficiente. Sobretudo quando se evapora. Isto tem que ver com o seu calor específico - cerca de cinco vezes superior ao do ferro fundido – e, principalmente, com o seu elevado calor latente de vaporização (mais de dez vezes maior do que o calor latente de fusão dos ferros fundidos).

Os valores respectivos são:

- Calores específicos:
  - Ferro Fundido (a altas temperaturas)  $\approx 840 \text{ J/kg. } ^\circ\text{K} \approx 0.20 \text{ cal/g. } ^\circ\text{C}$
  - Água (0 a 100 °C)  $\approx 4200 \text{ J/kg. } ^\circ\text{K} \approx 1.0 \text{ cal/g. } ^\circ\text{C}$
- Calores latentes:
  - Fusão do ferro  $\approx 209304 \text{ J/kg} \approx 50 \text{ cal/g}$
  - Vaporização da água  $\approx 2260870 \text{ J/kg} \approx 540 \text{ cal/g}$

Quanto ao manipulador porta-pirômetros ópticos e tubeiras de ar-água para arrefecimento, foi construído para que, no tempo disponível entre sucessivos arrefecimentos das coquilhas possa ainda, se necessário, e depois de ter rodado 180°, controlar e até homogeneizar as temperaturas das peças vazadas, imediatamente antes de estas serem tratadas termicamente ou rectificadas via maquinagem. [Magalhães, Fundição em Coquilha, 1989]

### Tubos de Refrigeração

Outro método para promover o arrefecimento das coquilhas consiste na implementação de tubos de refrigeração (Fig. 20, 21 e 22) que as atravessam e que através de um fluido (por exemplo: água) regulam a temperatura.

Basicamente um tubo de refrigeração é um sistema de absorção e transferência de energia, que pode transportar mil vezes mais calor que o equivalente em cobre, para o mesmo gradiente de temperatura. Por outras palavras, tem uma maior condutividade térmica.

Quando o calor atinge a zona do evaporador, o fluido de trabalho entra em ebulição transformando-se em vapor, quando chega á zona do condensador, devido á pressão parcial existente, volta ao estado líquido libertando o calor latente. Nesta zona o calor é removido através de alhetas. Após a condensação, o líquido volta á posição original através do sistema de retorno capilar, completando assim o ciclo. [Zhang, Mucciardi, & Gruzleski, 2006]

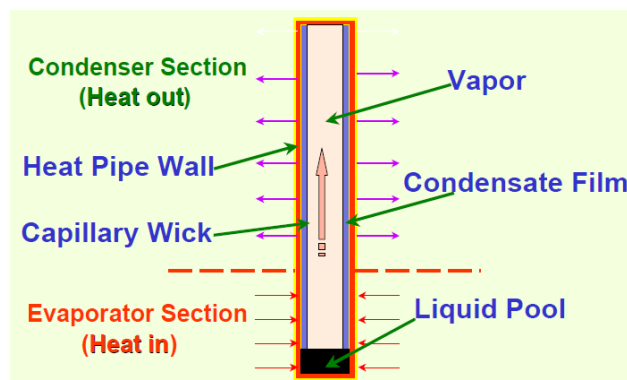


Fig. 20 – Esquema genérico de um tubo de refrigeração

Vantagens:

- Tempo de ciclo reduzido
- Eliminação de pontos quentes
- Processo limpo
- Melhoria da qualidade do produto

- Aumenta o tempo de vida do molde
- Permite a utilização de moldes defeituosos
- Upgrade de moldes antigos

#### Desvantagens

- Ebulição do filme
- Refluxo do líquido de trabalho
- Dificuldade na aplicação a coquilhas rotativas



Fig. 21 - Implementação dos tubos de refrigeração num molde permanente

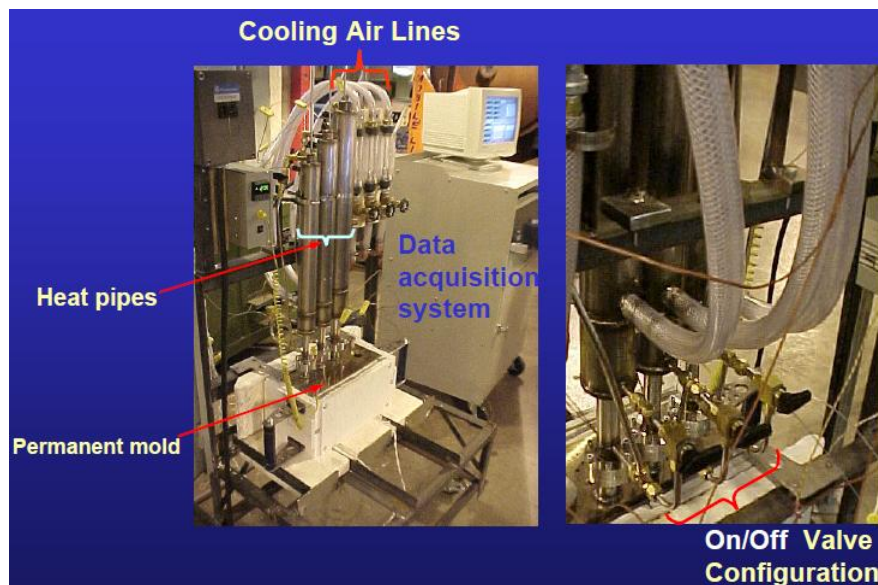


Fig. 22 – Sistema de refrigeração

## 2.4 Sistemas de Vácuo

O termo vácuo é geralmente usado para denominar uma determinada região do espaço, onde a temperatura é inferior a 1at. O vácuo absoluto, que implica um espaço onde a existência de matéria é nula é fisicamente impossível.

A vantagem da implementação de um sistema de vácuo numa coquilha (Fig. 23) reside no facto de permitir um fluxo de metal tranquilo. Ao se adaptar um sistema deste género a uma coquilha ficaríamos próximos do processo de vazamento por baixa pressão, obtendo algumas das mesmas vantagens, que foram atrás descritas. [Hoffman, Singh, & III, 1998]

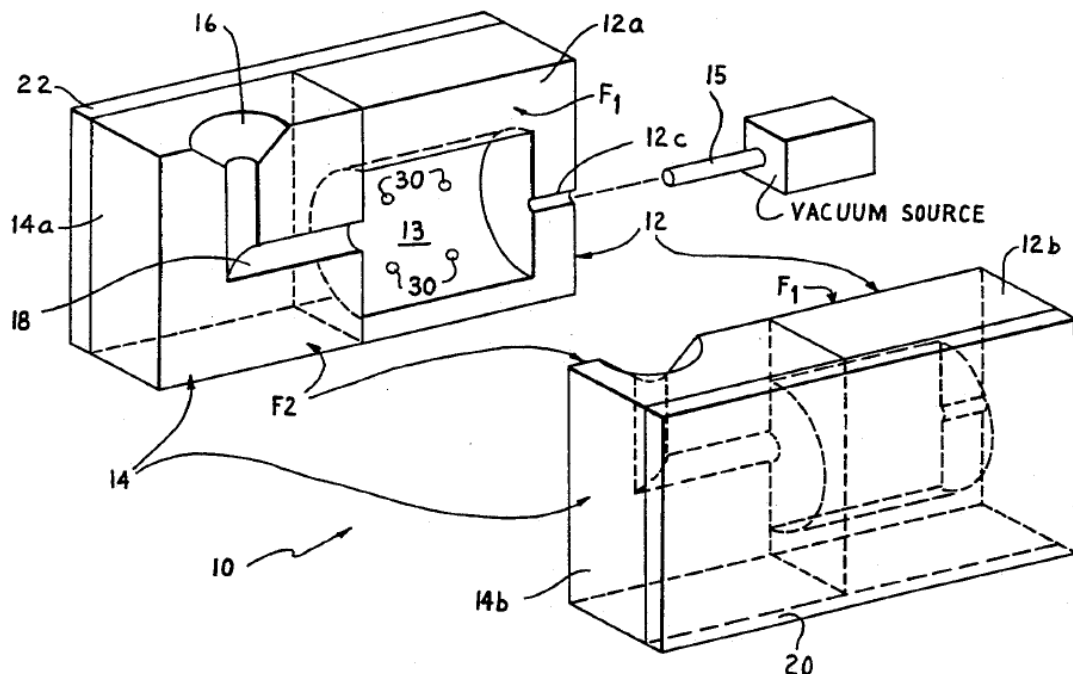


Fig. 23 – Esquema de montagem de um sistema de vácuo numa coquilha

Como se pode observar na figura 23, o metal seria vazado numa das extremidades, dado que ao mesmo tempo seria gerado um efeito de vácuo pelo mecanismo identificado com o número 15. Essa implementação permitiria que o metal fluísse através do sistema de gitagem de uma forma laminar, eliminando o efeito de turbulência gerado pela aceleração “desgovernada” do metal, fazendo com que a qualidade do produto final seja melhorada significativamente. Uma outra vantagem será a de extrair o ar presente no interior da moldação, ar esse que é responsável por vários defeitos nas peças de fundição. [Muskegon, Whitehall, & Johnson, 1994]

## **2.5 Ligas Usadas para Vazamento em Coquilha**

### **2.5.1 Introdução**

Nos metais que podem ser vazados em moldações permanentes incluem-se as ligas de alumínio, magnésio, zinco, cobre e ferro fundido cinzento hipereutético, como já foi referido anteriormente. As ligas de alumínio são as ligas metálicas mais comumente utilizadas neste processo de fundição e as de magnésio as menos utilizadas.

Os tamanhos práticos para moldações permanentes variam de acordo com o material a ser vazado, o número de partes necessárias e a configuração destas. As peças produzidas por este processo, embora possam atingir pesos elevados, situam-se normalmente na gama compreendida entre os 0,5 kg e os 50 kg.

Ligas de alumínio: Já foram vazadas em moldações permanentes, e para grandes séries, peças em ligas de alumínio pesando mais de 70 kg. Para tal recorreu-se ao uso de dispositivos mecânicos de movimentação dos moldes. No entanto podem ser produzidas peças de maiores dimensões.

Ligas de magnésio: Apesar da sua fraca fluidez ou vazabilidade, têm sido usadas em fundições com moldações permanentes ou semi-permanentes para produzir peças relativamente grandes e complexas.

Ligas de cobre: Raramente se justifica vazar peças em ligas de cobre num molde permanente pesando mais de 10kg.

Ligas de ferro fundido cinzento: A produção de peças em ferro fundido cinzento em moldes permanentes é raramente praticada quando estas pesam mais de 15kg.

A tabela 5 indica valores aproximados das temperaturas de vazamento das ligas referidas e de trabalho das coquilhas e do tempo de vida destas. De notar que a superfície da coquilha em contacto com o metal vazado pode atingir, momentaneamente, temperaturas próximas deste, dependentes das barreiras térmicas eventualmente empregues e das pressões de contacto.

Obviamente que os valores do quadro são meramente indicativos. Eles dependem muito das dimensões e da forma das peças, dos materiais e revestimentos das coquilhas, etc.

**Tabela 5 – Temperaturas de trabalho de coquilhas utilizadas no vazamento de diversas ligas**

<b>Liga Vazada</b>	<b>Temperaturas de Vazamento °C</b>	<b>Vida aproximada das Coquilhas (n° de vazamentos)</b>	<b>Temperaturas de trabalho das Coquilhas °C</b>
<b>Ferros Fundidos Cinzentos (e nodulares)</b>	1260 - 1490	3000 - 30 000	250 - 430 (100 - 500)
<b>Ligas de Cobre</b>	1040 - 1150	5000 - 20 000	120 - 260
<b>Ligas de Alumínio</b>	700 - 760	até 100 000	340 - 430 (290 - 500)
<b>Ligas de Magnésio</b>	650 - 710	20 000 a 100 000	150 - 320
<b>Ligas de Zinco</b>	390 - 430	100 000 ou mais	200 - 260

Um dos objectivos deste trabalho consiste na pesquisa de ligas de alumínio e das suas características e adaptabilidade a este tipo de processo de fundição, sendo que os capítulos seguintes se referem apenas às características desta mesma liga. [Brown, Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, 2000] [Brown, Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, 2000] [Magalhães, Fundição em Coquilha, 1989]



## 2.5.2 Ligas de Alumínio

### 2.5.2.1 Origem das Ligas de Alumínio

O alumínio é um material de utilização relativamente recente em comparação com outros metais pré-históricos, como o cobre e o ferro.

A sua descoberta deve-se ao cientista *Humphrey Davy* que, em 1808, o designou por “*Aluminium*” sem, contudo, conseguir isolá-lo dos seus compostos.

Em 1825, *Oersted* conseguiu obter um pedaço de alumínio muito impuro e, em 1829, *Woehler* obteve alumínio sob a forma de pó, tentando realizar a sua aglomeração sob pressão.

Em 1845, *Sainte-Claire Deville*, continuando os trabalhos de *Woehler*, obteve o primeiro bloco metálico fundido, em cadinho inerte sob fluxo de um sal de sódio, os glóbulos de alumínio aglomerados sob pressão.

O processo de obtenção do alumínio por via química desenvolveu-se industrialmente em França onde, em 1860, já se produziam 500 kg por dia.

Em 1886, graças aos progressos obtidos na produção de energia eléctrica, *Hérault*, em França, e *Hall*, nos EUA, registaram aparelhos para a produção de alumínio por via electrolítica que se tornaram base de todos os processos modernos de electrólise do alumínio.

O alumínio puro foi utilizado primeiramente na fundição e só mais tarde laminado e estrudido para o fabrico de chapas e perfilados. [Wikipedia.org]

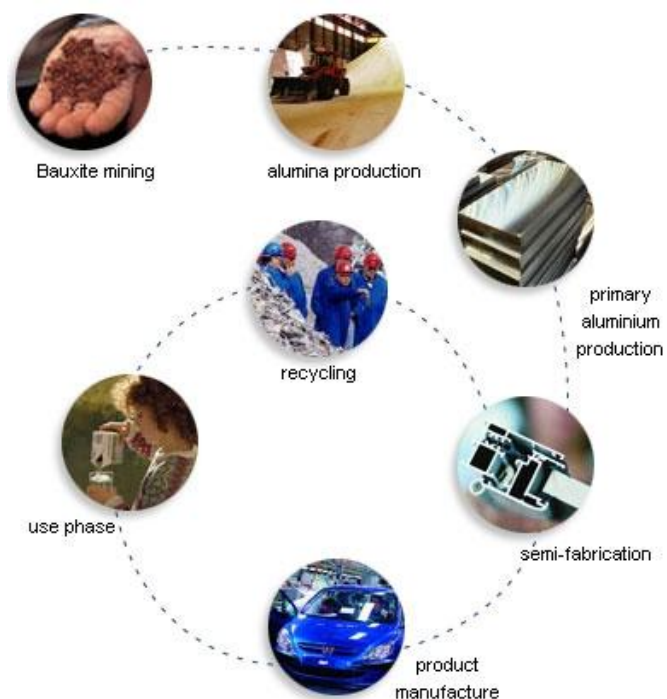


Fig. 24 – Esquema de obtenção do alumínio

O alumínio é um metal branco, brilhante, muito leve, densidade aproximada 2,70, que funde por volta dos 660 °C. Tem boa resistência à acção do ar ao recobrir-se de uma capa de óxidos e carbonato de alumínio que protege as peças de uma posterior oxidação. É muito dúctil e maleável, podendo ser laminado, estirado e forjado com grande facilidade.

Tabela 6 – Características gerais do alumínio

<b>Geral</b>	
Nome, símbolo, número	Alumínio, Al, 13
Classe, série química	Metal, família do boro
Grupo, período, bloco	13, 3, p
Densidade, dureza	2.7, 2.75 (Escala de Mohs)
Cor	Cinza prateado
<b>Propriedades atómicas</b>	
Massa atómica	26.9815386(8) u
Raio médio	125 pm
Raio atómico calculado	118 pm
Raio covalente	118 pm
Estrutura cristalina	Cúbica de faces centradas
<b>Propriedades físicas</b>	
Estado da matéria	Sólido
Ponto de fusão	933.473 K (660.323 °C)
Ponto de ebulição	2792 K (2518 °C)
Entalpia de vaporização	293.4 kJ/mol
Entalpia de fusão	10.79 kJ/mol
Pressão de vapor	2.42 X 10 <sup>-6</sup> Pa a 577 K
Velocidade do som	5100 m/s a 933 K
Electronegatividade	1.61 (Escala de Pauling)
Calor específico	900 J/(kg.K)
Condutividade eléctrica	37.7 X 10 <sup>-6</sup> /mΩ
Condutividade térmica	237 W/(m.K)

Este metal contém geralmente pequenas impurezas de ferro e silício. Estas impurezas aumentam a dureza do mesmo, bem como a sua resistência, se bem que diminuam o alongamento. Na figura seguinte é feita a comparação do alumínio puro com outros metais.

Tabela 7 – Comparação de algumas propriedades do alumínio com outros metais

Metal	Densidade	Ponto de Fusão (°C)	Calor Espec. (20°C) Cal °C <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup>	Calor latente fusão Cal g <sup>-1</sup>	Quantidade de calor 20°C ao ponto fusão + 100°C	
					Cal/g	Cal/cm <sup>3</sup>
Al	2,69	860	0,215	94,5	254	684
Mg	1,74	650	0,245	89	274	477
Fe	7,87	1356,5	0,11	65,5	224	1783
Cu	8,96	1083	0,092	50,6	158	1416
Ni	8,90	1453	0,105	73,8	235	2092

Ainda que o alumínio seja um dos principais constituintes da crosta terrestre (Sial), nem todos os minerais que contem alumínio são susceptíveis de serem utilizados economicamente para a sua obtenção. Utiliza-se principalmente a Bauxita, nome derivado da localidade de *Les Baux*, perto de *Arlés* (França). O conteúdo de óxido de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , entre 50 a 65%. O procedimento de obtenção do alumínio consiste na redução do óxido por electrólise entre eléctrodos de carvão, fazendo passar a corrente eléctrica por uma massa fundida de óxido de alumínio e criolite ( $3\text{FNa F}_3\text{Al}$ ).

### 2.5.2.2 Denominação das Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio são as ligas mais versáteis entre todas as ligas passíveis de utilização em fundição. O alumínio "adapta-se" praticamente a todos os processos de fundição.

As ligas de alumínio têm um baixo ponto de fusão (650 – 760 °C), o que se traduz numa maior flexibilidade no processamento destas ligas e numa menor manutenção do equipamento de fusão.

Os elementos de liga mais importantes são o silício, o cobre, o magnésio e o zinco com os quais o alumínio forma ligas binárias em teores que, em geral, não vão além dos 10%. A estas ligas binárias juntam-se frequentemente outros elementos de liga tais como o manganês, o ferro, o níquel, o titânio, o chumbo e o estanho cujos teores vão de 0,1 a 3%, originando-se assim as ligas complexas. As primeiras ligas utilizadas em fundição foram as de alumínio-cobre a que se seguiram as de alumínio – silício, sendo as ligas de alumínio – magnésio e alumínio – zinco as de utilização mais recente com o desenvolvimento da fundição em coquilha e da fundição injectada.

Na designação da *Aluminum Association* (AA), existem quatro dígitos numéricos, com um ponto entre o terceiro e o quarto dígito. O significado dos quatro dígitos:

Primeiro dígito – Elemento principal da liga

Segundo e terceiro dígito – Elementos de liga mais importantes

Quarto dígito – Peças (0), lingote (1,2)

Variações na composição química que são irrelevantes, não tendo por isso uma identificação numérica, são identificadas por uma letra (A, B, C, etc.) que antecede a designação numérica da liga.

Pode-se então definir as ligas de alumínio usadas em fundição da seguinte forma:

- 1XX.X – Alumínio puro (> 99.00%)
- 2XX.X – Ligas Alumínio – Cobre
- 3XX.X – Ligas Alumínio – Silício + Cobre e/ou Magnésio
- 4XX.X – Ligas Alumínio – Silício
- 5XX.X – Ligas Alumínio – Magnésio
- 6XX.X – Série não usada
- 7XX.X – Ligas Alumínio – Zinco
- 8XX.X – Ligas Alumínio – Estanho
- 9XX.X – Ligas Alumínio – Outros elementos

Na designação das ligas do tipo 1XX.X, o segundo e o terceiro dígito indicam o teor mínimo de alumínio, por exemplo, a liga 170.0 contém uma percentagem de alumínio mínima de 99.70%.

Da série 2XX.X até á 8XX.X o segundo e o terceiro dígito não tem um significado numérico, apenas identificam arbitrariamente ligas dentro de cada grupo.

Em todas as séries, o quarto dígito, indica a forma do produto:

- 0 – Peças
- 1 – Lingote padrão
- 2 – Lingote de composição variada mas com os limites dentro dos mesmos do lingote padrão

### **2.5.2.3 Efeito dos Elementos de Liga**

#### **Antimónio**

Em níveis de concentração iguais ou superiores a 0.10%, o antimónio afina as ligas eutéticas alumínio – silício. O efeito é essencialmente o da modificação estrutural, transformando uma estrutura com uma forma fibrosa numa estrutura lamelar eutética. A eficácia da alteração estrutural depende de uma ausência de fósforo e da taxa de solidificação. O antimónio também reage com estrôncio e o sódio, formando compostos intermetálicos grosseiros ou com efeitos adversos na fusibilidade do material. O antimónio é classificado com um metal pesado com um elevado potencial tóxico causando implicações higiénicas, especialmente quando associado com  $\text{SbH}_3$ .

#### **Berílio**

A adição de algumas partes por milhão de berílio pode ser eficaz na redução das perdas por oxidação e inclusões em compostos que contém magnésio. Em concentrações mais elevadas ( $> 0.04\%$ ), o berílio afecta a forma e a composição de elementos que contém ferro, melhorando por outro lado a ductilidade e a resistência mecânica. Além de alterar a morfologia de fases insolúveis, o berílio muda a sua composição, rejeitando magnésio que provém do elemento complexo Al-Fe-Si, permitindo assim a sua plena utilização para fins de endurecimento. Elementos que contém berílio são agentes cancerígenos, que exigem cuidados especiais na fusão, movimentação do metal líquido, movimentação das escórias e tratamento das mesmas.

#### **Bismuto**

Adição de bismuto em concentrações superiores a 0.1% melhora a maquinabilidade das ligas de alumínio.

### **Boro**

O boro quando combinado com outros metais tem tendência para a formação de boretos, tais como o  $\text{AlB}_2$  e o  $\text{TiB}_2$ . O boreto de titânio forma núcleos estáveis que interagem com o  $\text{TiAl}_3$ , provocando um refinamento de grão mais acentuado. Boretos metálicos reduzem significativamente a vida das ferramentas usadas em operações de maquinagem e formam inclusões que afectam as propriedades mecânicas e a ductilidade. O tratamento com boro, usado nas ligas de alumínio que contém elementos peritéticos tais como o titânio, zircónio e o vanádio é praticado para melhorar a pureza e a condutibilidade eléctrica destas ligas. O boro torna também mais duradouro o efeito do titânio como afinador de grão.

### **Cádmio**

Quando adicionado em concentrações superiores a 0.1% o cádmio melhora a maquinabilidade. Algumas precauções têm que ser tomadas uma vez que o cádmio volatiliza a 767 °C.

### **Cálcio**

O cálcio é um modificador estrutural muito fraco, principalmente para as ligas eutéticas de alumínio – silício. Aumenta a solubilidade do hidrogénio que é o principal causador de porosidades nas peças após vazamento. Em concentrações superiores a 0.005% reduz a ductilidade das ligas de alumínio – magnésio.

### **Chumbo**

O chumbo é usado em concentrações superiores a 0.1% de forma a melhorar a maquinabilidade.

### **Crómio**

O crómio forma o composto  $\text{CrAl}_7$ , que apresenta uma solubilidade no estado sólido muito limitada, sendo usado por isso para suprimir a tendência que algumas ligas apresentam para o crescimento de grão. Melhora a resistência a temperaturas elevadas.

## **Cobre**

O cobre aumenta substancialmente a resistência e o endurecimento superficial. Ligas que contem cerca de 4 a 5.5% de cobre tem uma resposta mais eficaz a tratamentos térmicos e apresentam propriedades mecânicas mais elevadas após vazamento. O cobre reduz a resistência à corrosão. Inversamente ao referido na frase anterior, baixas concentrações de cobre introduzidas em ligas de alumínio – zinco inibem a corrosão. Reduz a tendência a fissuração a quente e aumenta o potencial para a diminuição do tamanho das dentrites.

## **Estanho**

O estanho é responsável pelas excelentes propriedades de antifricção de algumas ligas, sendo portanto usado em algumas em que essa propriedade é muito importante, tal como, chumaceiras. As ligas de fundição podem conter até 25% de Sn. O estanho melhora a maquinabilidade.

## **Estrôncio**

O estrôncio é um modificador do eutético das ligas de alumínio – silício. Essa modificação é obtida através de adições muito reduzidas, entre 0.008 a 0.04%. Adições muito elevadas traduzem-se em porosidades. A degasificação das ligas torna-se complicada se esses mesmos níveis forem elevados.

## **Ferro**

Aumenta a resistência á fissuração a quente e diminui a adesão às moldações em fundição sob pressão. Com o aumento do teor de ferro as peças tem tendência para diminuir a ductilidade. O ferro reage com outros compostos e forma um elevado número de compostos intermetálicos, tais como,  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{FeMnAl}_6$  e  $\alpha\text{AlFeSi}$ . Estes compostos são insolúveis e são responsáveis pelo aumento da resistência, especialmente a temperaturas elevadas, mas também pela fragilização da microestrutura. Á medida que a fracção de fases insolúveis aumenta com o aumento do teor de ferro, algumas das propriedades de fundição relacionadas com a alimentação das peças, é gravemente afectada. O ferro participa na formação de escórias, juntamente com o magnésio, crómio e outros elementos. Actua como refinador de



grão excepto nas ligas alumínio – silício. É responsável pela diminuição da contracção das peças após fundição.

### **Fósforo**

Adicionado sob a forma de  $AlP_3$ , o fósforo tem a tendência para refinar o silício primário em ligas de alumínio – silício hipereutéticas. A adição de algumas partes por milhão, o fósforo transforma a estrutura eutética numa estrutura hipoeutética, nas ligas de alumínio – silício, e diminui a acção de alguns modificadores eutéticos, tais como, o sódio e estrôncio.

### **Magnésio**

O magnésio é a base para o aumento da resistência e endurecimento estrutural das ligas de alumínio – silício tratadas termicamente, sendo também usado em ligas mais complexas de alumínio – silício, que contêm cobre, níquel e outros elementos, exactamente pelo mesmo motivo. A fase endurecedora,  $Mg_2Si$  apresenta um limite de solubilidade muito próximo de 0.70% Mg, abaixo do qual não existe mais endurecimento ou começa a haver amaciamento da matriz. Ligas de alumínio – silício de alta resistência apresentam um teor de magnésio que varia de 0.4 ate 0.70%. Ligas binárias de alumínio – magnésio são extremamente usadas em aplicações que requerem um acabamento superficial brilhante, uma excelente resposta a acabamentos químicos, resistência a corrosão e uma relação resistência/ductilidade muito atractiva.

### **Manganês**

Normalmente considerado como impureza, o manganês é controlado abaixo de certos valores na maior partes dos vazamentos por gravidade. Nas ligas trabalhadas mecanicamente o manganês é um elemento extremamente importante, uma vez que facilita esse mesmo trabalho mecânico efectuado sobre as ligas. O manganês pode também ser usado para melhorar a resposta de algumas ligas a acabamentos químicos. Responsável também pela diminuição da contracção após fundição. Atua como refinador de grão. Nas ligas de Al-Cu e Al-Si melhora a resistência à tração a altas temperaturas. Na presença de ferro pode ter efeito contrário.

### **Mercúrio**

Compostos que contêm mercúrio foram desenvolvidos como ânodos sacrificiais para sistemas de protecção catódicos, especialmente para ambientes marítimos. O uso destas ligas extremamente electronegativas foi seriamente restringido devido a questões ambientais.

### **Níquel**

O níquel é combinado com o cobre para melhoria das propriedades a temperaturas elevadas, reduzindo também o coeficiente de expansão térmico. Melhora a estabilidade dimensional e a resistência a temperaturas elevadas. 5% de níquel produz uma contracção muito elevada.

### **Prata**

Usada em proporções extremamente reduzidas, nas ligas de alumínio – cobre, apenas com a função de melhorar a resistência. Contribui para o aumento do endurecimento por precipitação e aumento da resistência á corrosão.

### **Silício**

O silício tem um efeito extraordinário nas ligas de alumínio, melhorando quase todas as características de fundição destas ligas. Adições de silício melhoram significativamente a colabilidade, resistência á fissuração a quente e características de alimentação dos moldes. Em todas as ligas de alumínio usadas em fundição, são as de alumínio – silício que desempenham o papel mais importante. O aumento de silício na composição de algumas ligas é extremamente importante, pois, aumenta a colabilidade permitindo que as peças fundidas tenham espessuras reduzidas e pormenores complicados de se obter com outros elementos. As ligas de alumínio – silício são as mais resistentes á fissuração durante a solidificação. O teor de silício presente nas ligas de alumínio – silício corresponde as características de solidificação de cada processo. Para processos em que o arrefecimento se dá lentamente, tais como, cera perdida e moldação em areia o teor varia de 5 a 7%, para moldações permanentes o teor já varia de 7 a 9% e para coquilhas varia entre 8 a 12%. A base para estas recomendações deve-se as relações entre a taxa de arrefecimento, colabilidade e da

percentagem de eutético durante o processo de solidificação. O silício também reduz o peso específico e o coeficiente de expansão térmico.

### **Sódio**

O sódio é um elemento modificador do eutético das ligas de alumínio – silício. O sódio reage com o fósforo reduzindo assim a capacidade de modificação do eutético, fazendo também com o que o fósforo refine a silício primário. Percentagens inferiores a 0.005% traduzem-se numa fragilização das ligas de alumínio – magnésio. Adições periódicas são necessárias para manter os níveis de modificação, uma vez que o sódio tem a tendência para se desvanecer completamente no alumínio. Ao contrário de outros modificadores estruturais, o sódio é eficaz independentemente das características de solidificação.

### **Titânio**

O titânio é principalmente utilizado como afinador de grão das ligas alumínio usadas em fundição, normalmente combinado com pequenas quantidades de boro. Por vezes o titânio é usado em concentrações acima das necessárias para a afinação de grão, isso acontece tendo como objectivo reduzir as fissurações. É também responsável pelo aumento da ductilidade e resistência a tracção, diminuindo por outro lado a condutividade térmica.

### **Zinco**

A simples adição de zinco não traz grandes benefícios em termos de fundição das ligas de alumínio, mas quando combinado com cobre e/ou magnésio tem como efeito melhorar as características das ligas para tratamentos térmicos e como agente no envelhecimento natural das peças. Em combinação com o Mg produz alta resistência ao impacto, alta resistência à tracção e excelente ductilidade. Pequenos teores de Zn nas ligas Al-Cu melhoram a maquinabilidade. Alto teor produz alta contração e fragilidade a quente. [Cramer, 2003]

### 2.5.2.4 Fluidiez e Aptidão para obtenção de Revestimentos de Protecção e decoração

As características de fluidez de algumas ligas de alumínio são apresentadas no quadro seguinte, de uma maneira sucinta.

**Tabela 8 – Colabilidade e aptidão aos revestimentos de protecção e decoração dos principais processos de fundição**

Nome da liga	Colabilidade	Fundição em areia	Fundição em coquilha	Fundição injectada
<b>Al Puro</b>	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca
<b>Al-Cu</b>	Fraca	Fraca	Pobre	Imprópria
<b>Al-Si-Cu/Mg</b>	Boa	Boa	Boa	Boa
<b>Al-Si</b>	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
<b>Al-Mg</b>	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca
<b>Al-Zn</b>	Fraca	Boa	Imprópria	Imprópria

A anodização é o processo mais utilizado para acabamento e protecção do alumínio e das suas ligas, permitindo obter superfícies de grande qualidade para fins decorativos. É, porém, um processo cheio de surpresas e dificuldades pela dificuldade de obter superfícies uniformes para submeter á anodização. A percentagem dos elementos presentes na liga e a sua solubilidade são factores que determinam a acção protectora e a tonalidade de cor da camada anodizada.

No caso de peças obtidas por fundição, além destes factores, há que considerar o tamanho de grão, porosidades, inclusões e outros defeitos que, mesmo disfarçados no polimento, aparecem durante o processo de oxidação anódica, tornando as peças impróprias para utilização. O processo de revestimento electrolítico, embora menos utilizado para o alumínio do que para outros metais, permite, contudo, em certos casos e com técnica adequada, a deposição de zinco, cobre, níquel, crómio, prata e ouro.

As ligas com teores moderados em zinco e magnésio aceitam bem a anodização, o mesmo sucedendo com as ligas de alumínio-cobre até 4 ou 5%, desde que as peças fundidas sejam tratadas termicamente. Quanto aos revestimentos electrolíticos, além do alumínio puro, são as ligas de alumínio-cobre as que melhor se prestam a este tratamento. No quadro seguinte dá-se uma ideia geral da aptidão das várias ligas de alumínio a processos de revestimento de protecção e decorativos.

Tabela 9 - Comparação entre as diferentes ligas de alumínio usadas em fundição (2)

Nome da liga	Anodização contra a corrosão	Anodização e coloração	Anodização brilhante	Revestimento electrolítico
<b>Al Puro</b>	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
<b>Al-Cu</b>	Boa	Excelente	Fraca	Excelente
<b>Al-Si-Cu/Mg</b>	Boa	Fraca (**)	Imprópria	Fraca (*)
<b>Al-Si</b>	Fraca	Imprópria	Imprópria	Fraca (*)
<b>Al-Mg</b>	Excelente	Fraca (***)	Imprópria	Fraca
<b>Al-Zn</b>	Fraca	Imprópria	Imprópria	Fraca

(\*) – Estas ligas requerem um tratamento de modificação para uma boa adesão

(\*\*) – Própria para cores escuras

(\*\*\*) – As condições de anodização devem ser cuidadosamente controladas

### 2.5.2.5 Outras Características Esperdas nas Peças Produzidas

Outras características como a resistência à fissuração a quente, estanqueidade, maquinabilidade e resistência á corrosão podem observar-se na tabela 10.

**Tabela 10 - Comparação das ligas de alumínio relativamente à fissuração a quente, estanqueidade, maquinabilidade e resistência á corrosão**

<b>Nome da liga</b>	<b>Resistência à fissuração a quente</b>	<b>Estanqueidade</b>	<b>Maquinabilidade</b>	<b>Resistência à corrosão</b>
<b>Al Puro</b>	Pobre	Fraca	Fraca	Excelente
<b>Al-Cu</b>	Pobre	Pobre	Boa	Fraca
<b>Al-Si-Cu/Mg</b>	Boa	Boa	Boa	Boa
<b>Al-Si</b>	Excelente	Excelente	Fraca	Excelente
<b>Al-Mg</b>	Boa	Pobre	Boa	Excelente
<b>Al-Zn</b>	Pobre	Pobre	Excelente	Pobre

Na tabela seguinte é feita a comparação das propriedades mecânicas das ligas de alumínio vazadas pelos processos de fundição em areia e fundição em coquilha.

**Tabela 11 - Comparação das propriedades mecânicas das ligas vazadas pelos processos de fundição em areia e em coquilha**

Nome da liga	Fundição em areia				Fundição em coquilha			
	Tensão de rotura kg/mm <sup>2</sup>	Limite elástico a 0.1% kg/mm <sup>2</sup>	Alongamento em 50mm %	Dureza Brinell 1000/10	Tensão de rotura kg/mm <sup>2</sup>	Limite elástico a 0.1% kg/mm <sup>2</sup>	Alongamento em 50mm %	Dureza Brinell 1000/10
<b>Al Puro</b>	8	3	30	25	8	3	40	25
<b>Al-Cu</b>	29	20	5	95	34	20	10	100
<b>Al-Si-Cu/Mg</b>	25.5	22	-	100	31	21	1	110
<b>Al-Si</b>	17	6	8	55	20	7	13	60
<b>Al-Mg</b>	31	17	15	85	35	20	20	95
<b>Al-Zn</b>	20 (*)	17 (*)	-	110 (*)	-	-	-	-

(\*) – Propriedades atingidas várias semanas após fundição

Na tabela 12 estão referenciadas algumas das características térmicas e eléctricas das ligas de alumínio.

Tabela 12 – Comparação de algumas características térmicas e eléctricas

Nome da liga	Peso específico	Coefficiente de dilatação linear (20-100 °C) x 10 <sup>-6</sup> /°C	Condutibilidade térmica a 20 °C cal/cm.s.°C	Resistividade eléctrica a 20 °C mm <sup>2</sup> /m
<b>Al Puro</b>	2.74	24	0.50	0.029
<b>Al-Cu</b>	2.83	23	0.33	0.044
<b>Al-Si-Cu/Mg</b>	2.77	21	0.29	0.065
<b>Al-Si</b>	2.71	20	0.34	0.047
<b>Al-Mg</b>	2.59	25	0.21	0.082
<b>Al-Zn</b>	3.07	24	0.35	-



Na tabela 13 é feita a referência às aplicações práticas mais usuais para as diferentes ligas de alumínio.

**Tabela 13 – Aplicações das ligas de alumínio**

Nome da liga	Utilizações específicas
<b>Al Puro</b>	Acessórios para a indústria eléctrica
<b>Al-Cu</b>	Caixas de engrenagens, manivelas, consolas, suportes
<b>Al-Si-Cu/Mg</b>	Cabeças de cilindros, corpos de válvulas, camisas de água, caixas de engrenagens, carburadores para a indústria automóvel, indústria alimentarem, peças finas e intrincadas para armamento, electricidade e mecânica
<b>Al-Si</b>	Peças finas e intrincadas para a mecânica e marinha, moldes para borrachas, utensílios domésticos
<b>Al-Mg</b>	Peças resistentes ao choque para a aviação, marinha e transportes
<b>Al-Zn</b>	Peças diversas obtidas por fundição em areia

[Mesquita, 1971]

### **2.5.2.6 Ligas de 1ª Fusão e Ligas de 2ª Fusão**

#### **Ligas de 1ª fusão**

A obtenção de ligas a partir do alumínio puro com a adição de elementos modificadores é o processo que permite a melhor qualidade das ligas de alumínio, embora seja mais moroso, sendo as ligas obtidas por este meio designadas por ligas de 1ª fusão.

Os elementos de liga podem ser adicionados directamente ao alumínio puro ou por meio de “ligas – mãe” que são ligas preparadas previamente para facilitar a sua dissolução no alumínio puro.

Assim as ligas de alumínio – cobre são obtidas juntando ao alumínio puro uma liga – mãe de alumínio – cobre a 33%.

As ligas de alumínio – silício são fabricadas adicionando ao alumínio puro uma liga – mãe de alumínio – silício a 50%.

As ligas de alumínio – magnésio e de alumínio – zinco são obtidas por adição directa dos respectivos metais, pois tanto um como outro são facilmente solúveis no alumínio fundido.

As ligas de alumínio – magnésio, alumínio – níquel e alumínio – titânio são obtidas também a partir de ligas – mãe, preparadas previamente, sendo correntes no comércio as ligas – mãe de alumínio – manganês a 10%, alumínio – níquel a 20% e alumínio – titânio a 0,5%.

Para as ligas complexas como, por exemplo, a liga de alumínio – cobre – silício – manganês, ou se utilizam as três ligas – mãe de alumínio – cobre, alumínio – silício e alumínio – manganês ou se prepara uma liga – mãe dos três elementos de liga indicados.

Estas ligas, de 1ª fusão, possuem propriedades químicas e mecânicas mais altas, mas o seu custo, também mais elevado, só justifica a sua utilização quando as peças que se pretende obter sejam de grande responsabilidade. Na maior parte das aplicações industriais utiliza-se outro tipo de ligas, com a mesma composição nominal das ligas de 1ª fusão, mas em que são tolerados certos elementos, ditos impurezas, desde que o seu teor esteja abaixo de um certo limite imposto nas normas. Estas são chamadas ligas de 2ª fusão ou ligas recicladas.

### **Ligas de 2ª fusão ou recicladas**

As ligas de 2ª fusão são obtidas em unidades industriais especializadas a partir da recuperação de sucatas e limalhas de peças fundidas e forjadas.

A escolha e classificação da sucata é feita tendo presente a forma da peça, o seu peso, dureza e aspecto da fractura. Existem contudo métodos mais rigorosos para a selecção das sucatas, entre os quais se destaca o método de ataque químico e os métodos eléctricos de medida da resistência por corrente de Foucault e de medida do potencial.

Dessa escolha resultam, pois, dois tipos de sucatas que têm tratamento diferenciado na recuperação. O primeiro é constituído pelas sucatas cuja composição é bem conhecida e a sua recuperação faz-se por fusão directa das sucatas e vazamento em lingotes. O segundo tipo é constituído por sucatas de composição duvidosa e a sua recuperação é feita com afinação das ligas. Quer num tipo quer noutro podem aparecer sucatas de dimensões muito diversas que têm de ser tratadas de modo diferente. Costuma dividir-se as sucatas em três grupos:

- 1º Grupo – Sucatas Volumosas
- 2º Grupo – Sucatas em bocados
- 3º Grupo – Aparas e Limalhas

As sucatas volumosas, como asas e carlingas de aviões, cárteres e blocos de motores de automóveis, etc., são derretidos em fornos de pré – fusão, de soleira inclinada, onde o alumínio fundido corre para uma cuba ficando os materiais de ponto de fusão mais elevado, como peças de bronze, de ferro, aço, etc., retidos na soleira do forno. O metal assim obtido é refundido novamente, tratado com cloro ou azoto, analisado, corrigido e vazado em lingotes.

As sucatas em bocados são primeiramente escolhidas e examinadas para ver se contem materiais estranhos tais como ferro, bronze, latão, chumbo, etc.

Nesta escolha é fácil separar logo as ligas de magnésio, devido ao seu menor peso. As ligas de alumínio – silício também se reconhecem facilmente pela fractura que se apresenta de cor acinzentada de grão fino.

As sucatas em bocados são fundidas em fornos de reverbero, rotativos ou semi – rotativos, aquecidos a gás ou a gasóleo. O metal é tratado com cloro ou azoto, doseado, corrigido e vazado em lingotes.

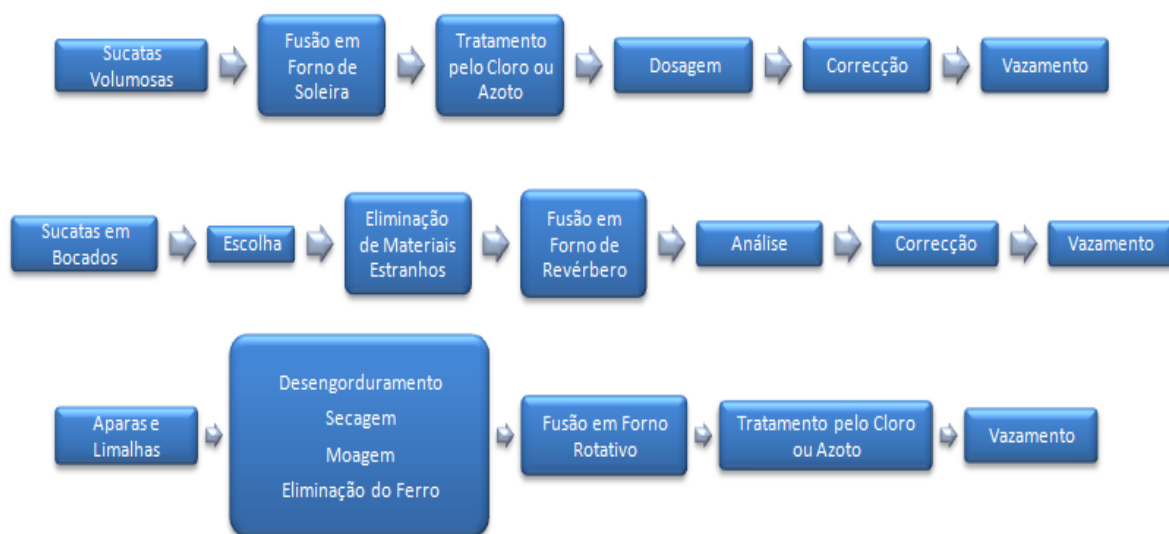
Quanto a aparas e limalhas, provindo de peças cuja composição química é bem conhecida, a sua recuperação faz-se directamente, não sendo, normalmente, proceder à afinação, a não ser em casos especiais, nomeadamente nas ligas de alumínio – magnésio. Com efeito, este elemento tem grande afinidade para o oxigénio pelo que o teor baixa, geralmente, durante a fusão sendo necessário proceder á sua correcção.

A recuperação das aparas e limalhas exige um certo número de operações preliminares, como o desgorduramento, secagem, montagem e eliminação do ferro. O desgorduramento pode fazer-se por vários processos, mas é recomendável a lavagem das aparas e limalhas com água quente e um dos vários detergentes existentes no comércio. Quando as aparas e limalhas contem grandes quantidades de água e óleo procede-se a uma centrifugação prévia para a redução daqueles líquidos.

A secagem é feita em tambores rotativos aquecidos a gás ou gasóleo, de tal modo que a temperatura dentro do tambor seja da ordem dos 150 a 250° C. Nas instalações mais modernas, estes tambores são providos de um sistema de lavagem e queima dos vapores libertados pelo óleo. É de desaconselhar a secagem das aparas directamente sobre os fornos de fusão, pois pode haver o perigo de combustão espontânea, como no caso das ligas de alumínio – magnésio, e também porque, geralmente, as aparas ficam queimadas por excesso de calor originado metal de qualidade inferior.

A moagem faz-se em moinhos rotativos e a eliminação do ferro, proveniente das ferramentas de corte, faz-se em tambores magnéticos concebidos para esse fim. Depois destes tratamentos as aparas e limalhas são misturadas com quantidades apreciáveis de fluxos e fundentes para evitar a oxidação e facilitar a fusão. A carga das aparas e limalhas não deve ser feita de uma vez só, mas sim por várias vezes para facilitar a fusão. Quando a primeira carga estiver fundida, junta-se a segunda e assim sucessivamente, de modo que o metal que já se encontra fundido vá dissolvendo pouco a pouco as aparas das novas cargas. O metal proveniente da recuperação das aparas e limalhas é vazado em lingotes, como no caso das sucatas, mas não deve ser utilizado directamente na fundição de peças, deve ser adicionado a lingotes de 1ª ou 2ª fusão de modo que o seu peso não exceda 20% da carga do forno. O controlo da composição química do metal contido no forno de recuperação é feito num espectógrafo existente no laboratório da fabrica, que, em poucos minutos, dá o teor dos elementos principais de liga existentes na amostra de metal retirada do forno. As correcções são, então, feitas no forno de modo que o metal vazado nas lingoteiras tenha já a composição química indicada nas respectivas normas. Os lingotes devem ter gravado na face superior as

iniciais da firma recuperadora e ser pintados com cores normalizadas correspondentes à liga que constitui. Estas duas particularidades são da máxima importância não só para garantia da qualidade da matéria – prima como também para facilitar a identificação no mercado e na indústria de fundição. A marcação dos lingotes com cores convencionais respeitantes às diversas ligas permite não só a sua identificação no mercado bem como a sua arrumação no armazém das matérias – primas da fundição. Esta identificação é particularmente importante nas ligas de alumínio dado que é muito difícil ou impossível à vista desarmada distinguir as diferentes ligas pela cor dos lingotes. Na figura 25 está representado um esquema do reaproveitamento das sucatas de alumínio.



**Fig. 25 – Esquema de reaproveitamento das sucatas de alumínio**

[Mesquita, 1971]

### **2.5.2.7 Defeitos de Fundição Associados às Ligas de Alumínio**

As peças obtidas através de processos de fundição não estão isentas de imperfeições, que contribuem para a qualidade final. Tais imperfeições só começam a ser encaradas como defeitos, ou falhas, quando a função e/ou aparência da peça estão em causa: deve então ser feita uma análise para determinar se existe a possibilidade de recuperação da peça ou, em casos mais graves, rejeitar ou substituir a mesma. Este tipo de decisão é dependente não só do defeito em si, mas também do seu significado relativamente à funcionalidade da peça e, por sua vez, ao controlo de qualidade a ser aplicado.

Existem três principais origens de defeitos:

- Projecto da peça
- Método de Produção utilizado
- Erros humanos

Um defeito pode ter como origem apenas uma das origens acima referidas, sendo portanto mais fácil de solucionar. Pode, contudo, resultar de uma combinação de factores, tornando as medidas necessárias para a resolução do problema mais difíceis de tomar. Todos os operários das fundições estão familiarizados com a persistência de defeitos, que desafiam constantemente a forma de os identificar e que subitamente desaparecem, sem qualquer clarificação da causa que lhes deu origem. Um controlo apertado e uma padronização de todos os aspectos envolventes na produção de uma qualquer peça acabam por ser a melhor defesa contra tais problemas. Precauções mais específicas podem ser tomadas nos casos em que se conhece a susceptibilidade a um defeito em particular, enquanto uma decisão mais radical, como a modificação do design da peça, poderá ser tomada em casos extremos, casos esses que não respondem às modificações na técnica de fundição.

Deve ficar claro que qualquer tentativa de eliminação de defeitos deve ser baseada em factores económicos. [Beely, 2001]

Existem vários tipos de defeitos em fundição, como por exemplo:

### **1. Defeitos de forma**

- Mal cheio
- Juntas frias
- Pontos frios
- Esquinas boleadas
- Fluxos excessivos

#### **Causas**

- Excesso de humidade
- Baixa velocidade – 0,5m/s – 60m/s
- Baixa temperatura vazamento
- Baixas espessuras
- Baixa colabilidade
- Vazamento interrompido

### **2. Inclusões**

- Reacção metal refractário
  - Óxidos dos cadinhos /cubas
  - Limpeza do banho, fluxos, cadinhos frios
  - Reacção metal atmosfera

#### **Causas**

- Limpeza do banho, fluxos
- Fusão e vazamento em vácuo e atmosfera controlada
- Turbulência e erosão
- Óleos e sujidades nas cargas
- Expansão moldação, machos
- Aderências, penetrações (tintas)

### **3. Gases**

#### **Causas**

- Ar retido e colapsado (Injecção, turbulência)
- Escapes de ar (vents)
- Machos
- Ligantes
- Aços efervescentes

#### **Solução**

- Fusão Al e H<sub>2</sub>
- Fusão Ti, Ni em vácuo
- Desgasificação rotor e vácuo

### **4. Contração no estado líquido e na mudança de estado**

- Propriedades das ligas utilizadas (por ex: Coeficiente de contração linear)
- Abatimentos
- Microrechupes
- Rechupes

#### **Solução**

- Alimentadores
- Solidificação dirigida, arrefecedores, camisas exotérmicas

### **5. Contração no estado sólido**

- Contrações
- Contrações diferenciais
- Fissuração a quente

#### **Solução**

- Ligas
- Relaxação de tensões



## 6. Dimensionais

- Contracções no estado sólido e líquido
- Contracções livres e impedidas

### Solução

- Rigidez das moldações
- Processos e geometria

## 7. Composição química e segregações

- Controlo das composições
- Segregações, homogeneização
- Perdas globais e selectivas
  - Evaporação selectiva
  - Oxidação selectiva

Apesar da lista acima referenciada, o alumínio é mais propício a certos defeitos, como a contracção no estado líquido e na mudança de estado, contracção no estado sólido, gases e inclusões. Embora estes sejam os defeitos mais comuns nas ligas de alumínio, a ocorrência dos restantes defeitos não deve ser desprezada, mas, neste capítulo a atenção será direccionada para os defeitos mais comuns.

### Inclusões – Grupo 2

As inclusões podem subdividir-se em dois grupos: endógenas e exógenas.

#### i) **Inclusões endógenas**

São partículas relativamente pequenas que permanecem em suspensão no metal líquido durante a fase de vazamento, ou que podem precipitar-se devido a alterações de solubilidade durante o arrefecimento. Podem ser encaradas não como defeitos no sentido macroscópico mas como, até certo ponto, uma característica inerente da liga ou do processo de fusão. Estão normalmente dispersas por toda a peça.

Reacções responsáveis pela formação de inclusões endógenas envolvem impurezas comuns, tais como oxigénio, azoto e enxofre, que interagem com os constituintes mais

reactivos da liga a ser vazada. A reacção mais comum é a oxidação, independentemente de ser accidental, devido ao ar presente na atmosfera, ou provocada deliberadamente com o intuito de refinar a estrutura da liga. Neste último caso o teor de oxigénio é estabilizado pela adição de desoxidantes antes do vazamento. Inclusões de óxidos, de elevado ponto de fusão, podem manter a sua composição inalterada, mas escória de composição complexa pode ser formada devido a reacções heterogéneas na interface da inclusão com o metal. Fluxos e refractários dos fornos podem ser envolvidos em reacções semelhantes. Outro tipo de inclusões pode resultar da alteração do equilíbrio da temperatura de fusão. A precipitação pode ser seguida de segregação de impurezas durante o arrefecimento. Este tipo de inclusões pode ser minimizado recorrendo a cargas e condições de fusão isentas de elementos que tenham tendência de as originar. O recurso á fusão em vácuo e/ou atmosferas inertes é outra das formas de minimizar o aparecimento de inclusões. É possível, em casos especiais, desoxidar com carbono ou hidrogénio, que levam á formação de produtos gasosos em substituição dos precipitados que iam ser originados. Á medida que as inclusões endógenas se formam, começa a eliminação por separação gravítica. Esta tendência é expressa na lei de Stoke, para pequenas partículas esféricas suspensas no metal líquido:

$$V = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{\mu}$$

Onde

$V$  = Velocidade de separação, m/s

$r$  = Raio da partícula , m

$\rho_1$  = Densidade do líquido, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_2$  = Densidade da partícula, kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  = Viscosidade do líquido, Ns/m<sup>2</sup>

A precisão das previsões com base nesta expressão deve ser limitada por outras influências, nomeadamente a da convecção no líquido, mas o raio da partícula é visto como o factor predominante na separação. Uma vez que as partículas de maiores dimensões se separam rapidamente, permite que o metal líquido possa permanecer no forno ou no cadinho durante um intervalo de tempo antes de se proceder ao vazamento, fazendo com que este seja

um método viável, apesar da continuidade de partículas mais pequenas no metal, visto que o tempo para a total eliminação das mesmas não é suficiente.

A importância do tamanho das partículas foi demonstrado, na prática, na desoxidação de aço, onde uma combinação de manganês e de silício, na proporção de 4:1, levou à formação de partículas que prontamente se aglutinaram em glóbulos de grandes dimensões levando à rápida separação dos mesmos.

A separação por acção gravítica não é um método eficaz no caso de ligas leves, uma vez que a diferença entre a densidade do metal e a densidade das partículas não é significativa, sendo que se torna fundamental não perturbar a superfície do metal durante o processo de fusão.

Contudo, o metal fundido pode ser tratado com o recurso a fluxos, que absorvem e dissolvem suspensões não-metálicas.

Inclusões que estejam no interior das peças não têm oportunidade de serem separadas graviticamente, pelo que têm que ser suprimidas mantendo os níveis de solubilidade baixos, recorrendo a critérios de selecção de cargas mais apertados e a técnicas de fusão e refinação apropriadas. Apesar das inclusões endógenas serem sintomáticas do estado geral do metal e não de um processo de fundição em particular, o seu controlo reside em grande parte no domínio da fusão prática.

### **ii) Inclusões exógenas**

As inclusões exógenas são constituídas por materiais não originários no próprio metal vazado. Estes materiais podem ter origem na desagregação das moldações, cadinhos ou quaisquer outras ferramentas em contacto com o metal líquido, podendo contribuir para o aparecimento de escórias.

As escórias podem evitadas através da decantação do metal antes do seu vazamento na moldação. Outro método possível é a filtração do metal aquando do seu vazamento, para o que se recorre a filtros de materiais cerâmicos.

A utilização de filtros tem outro efeito benéfico: diminui a turbulência causada pela entrada do metal líquido na cavidade da moldação. A turbulência contribui para o aparecimento de inclusões, não só porque facilita a erosão da moldação, mas também porque conduz facilmente ao aprisionamento de ar dentro da cavidade – um outro tipo de inclusões exógenas.

O aprisionamento de ar pelo metal na cavidade de moldação pode ter origem numa série de factores (isolados ou em combinação), de entre os quais:

- Turbulência excessiva no vazamento do metal fundido
- Insuficiente sobreaquecimento do metal fundido
- Sistema de ventilação inadequado

O enchimento mais lento da moldação facilita normalmente a libertação do ar, evitando o aparecimento de inclusões. O enchimento lento (recorrendo, se for necessário, ao vazamento por baixa pressão), direccionado e sem confluências evita igualmente a criação de outro tipo de inclusões endógenas: películas de óxidos. Estas películas, quando existentes, são transportadas na superfície frontal do fluxo metálico, podendo dar origem, nos casos mais graves, a descontinuidades na peça fundida.

### Gases – Grupo 3

Os gases podem estar presentes em peças fundidas em solução, como compostos químicos ou no interior das cavidades. Pode resultar do aprisionamento de ar durante o vazamento, a partir da evolução do contacto entre o metal líquido e material presente na moldação (do revestimento ou mesmo partículas metálicas provenientes do molde devido á erosão provocada pelo metal), ou podem ser precipitados durante a solidificação, quer como resultado da reacção química ou de uma mudança de solubilidade com temperatura.

Este tipo de defeitos provoca nas peças bolhas internas (Fig. 26), golpes na superfície, câmaras intermédias ou cavidades intergranulares, dependendo da causa que lhes deu efeito. Geralmente este tipo de defeitos apresenta uma forma arredondada, mas em alguns casos a forma é governada por outros factores: no caso da porosidade intergranular, por exemplo, os defeitos apresentam uma forma concava que tem origem normalmente na interface sólido-líquido, formando-se durante a precipitação.

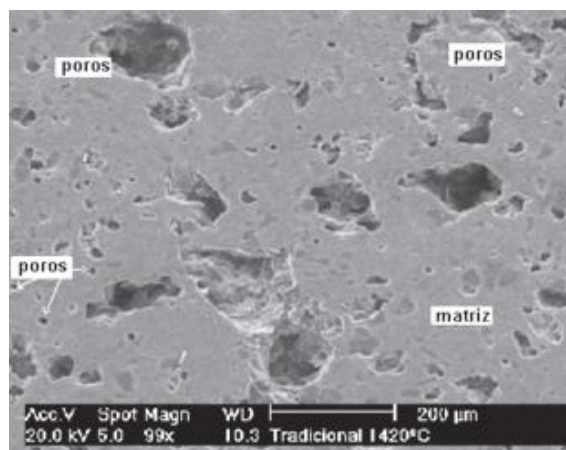
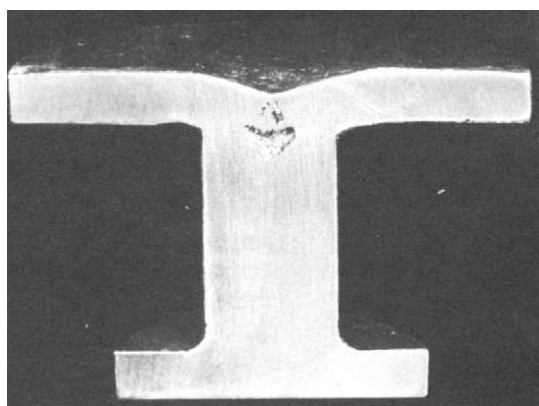


Fig. 26 – Poros causados por aprisionamento de gases

Embora as causas possam variar bastante, podem ser convenientemente considerados em dois grupos: os causados por aprisionamento físico durante o vazamento e os decorrentes da rejeição do metal durante a fase de arrefecimento.

### **Contração no estado líquido e na mudança de estado**

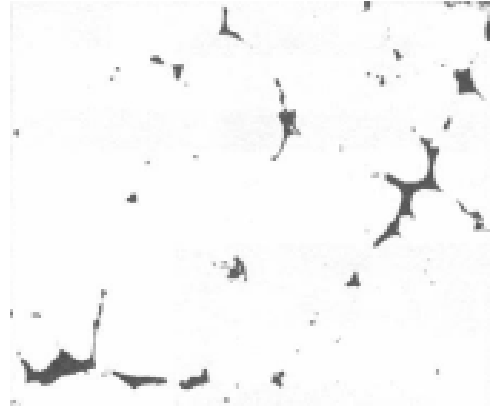
Os defeitos de contração no estado líquido (Fig. 27), surgem quando não se consegue compensar a falta de metal líquido na altura da solidificação, sendo que a sua ocorrência se deve a um mau sistema de gítagem ou má colocação do sistema de alimentação. A forma destes defeitos dependem de factores de design e de condições de arrefecimento.



**Fig. 27 – Rechupe**

Este tipo de cavidades deriva da falta de fornecimento de metal ou de um mau cálculo da direcção de solidificação durante o arrefecimento. O exemplo mais conspícuo é a cavidade preliminar de contração de um alimentador mal colocado: devido á falta de metal a cavidade estende-se para o interior da peça. Os defeitos internos costumam aparecer em zonas afastadas dos alimentadores. Dependendo das condições os defeitos podem ser cavidades massivas ou uma rede filamentar. Os locais típicos incluem as zonas centrais, onde nenhuma provisão foi feita tão pouco para a alimentação directa como para o arrefecimento selectivo. Embora estes defeitos se localizem em zonas onde é impossível efectuar qualquer tipo de operação de correcção, a sua posição próxima da linha central de esforço diminui a sua influência na peça, atendendo obviamente ás dimensões do defeito.

As ligas que solidificam rapidamente estão sujeitas a produzir cavidades bem definidas, enquanto que as ligas que solidificam mais lentamente tendem a produzir defeitos dispersos na microestrutura da peça. Este tipo de defeitos intercristalinos (microrechupes, (Fig. 28)) é agravado pela libertação de gás durante a fase de solidificação.



**Fig. 28 – Microrechupes**

[Beely, 2001]

### Contração no estado sólido

O arrefecimento de uma liga da temperatura de solidus até à temperatura ambiente é acompanhado por elevado nível de contração do metal. A magnitude dessa contração é indicado na tabela seguinte.

Tabela 14 – Comparação do coeficiente de expansão linear do alumínio e outros metais

<i>Metal</i>	<i>Coefficient of linear* expansion deg C<sup>-1</sup> × 10<sup>6</sup></i>	<i>Melting point °C</i>	<i>Approximate total linear contraction to 20°C %</i>
Aluminium	29.2	660	1.9
Copper	20.6	1083	2.2
Iron	17.3	1536	2.6
Lead	31.6	327	1.0
Magnesium	31.4	649	2.0
Nickel	18.4	1453	2.6
Tin	24.4	232	0.5
Zinc	35.9	420	1.4

Ao invés da contração no estado líquido e na mudança de estado, que podem ser compensadas através de um fluxo de metal, a contração no estado sólido afecta todas as dimensões lineares da peça obtida, daí a necessidade de se saber previamente o comportamento da liga recorrendo a propriedades previamente definidas e patenteadas. A contração no estado sólido inicia-se imediatamente após a formação de uma massa significativa de metal solidificar. Sob condições práticas, o metal nunca contrai livremente e tem por isso que desenvolver uma força coesiva suficiente para vencer as forças resistivas. A contração pode ser impedida pela moldação, pela pressão hidroestática do líquido residual e por outros constituintes do molde, devido ao arrefecimento diferencial dos mesmos. Tensões internas podem portanto surgir devido às restrições referidas anteriormente ou mesmo devido às condições térmicas por si só. O efeito sobre a peça fundida depende do nível das restrições relativamente às propriedades da liga utilizada, durante as sucessivas etapas durante o arrefecimento. Se a restrição é facilmente superada, a peça vai contrair de uma maneira previsível não gerando



Fig. 29 – Fissuração a quente

defeitos portanto. Se a restrição não for superada tão facilmente vai dar origem a uma tensão de tracção levando ao aparecimento de defeitos. A forma desse defeito vai depender das propriedades mecânicas no ponto em que a restrição se começa a tornar crítica.

Se a resistência á contracção se torna crítica a temperaturas elevadas, quando a liga se encontra num estado relativamente frágil devido aos filmes de escória, a probabilidade de se obter fissuração a quente (Fig. 29) é bastante elevada. Se a peça “sobreviver” a esta etapa mais vulnerável, o desenvolvimento de restrições á contracção, a temperaturas mais baixas, pode causar deformação plástica, tensões elásticas residuais ou fissuração a frio, dependendo da severidade e duração da restrição. [Beely, 2001]



## 2.5.3 Fusão e Tratamentos no Estado Líquido

### 2.5.3.1 Fusão do Alumínio

Para produzir consistentemente produtos de boa qualidade, as fundições tem obrigatoriamente que controlar as práticas de fusão dos metais que vão ser usados na obtenção das peças finais.

A fusão não pode ser considerada apenas como a transformação de metal sólido em metal líquido. A operação de fusão é importante pois é um dos factores que define a resistência dos produtos obtidos após fundição. Um bom equipamento de fundição e a aplicação das técnicas correctas são requisitos fundamentais para obter produtos, dentro dos limites práticos, que possuam boas propriedades mecânicas. O alumínio puro funde a 660 °C, o calor de fusão é cerca de 169 Btu/lb (393114.7 J/kg) e o calor específico a 100 °C são 0.226 cal/g. O alumínio atinge a temperatura de fusão rapidamente, sendo depois necessário fornecer mais energia para o alumínio passar totalmente a líquido, como se pode verificar na figura 30. O alumínio

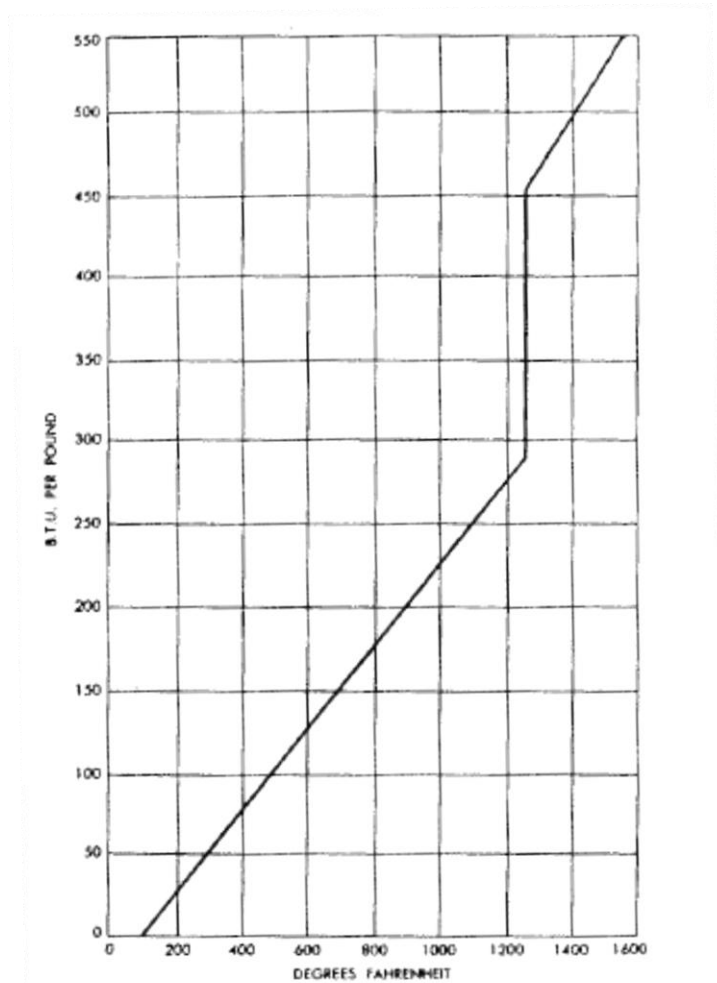


Fig. 30 – Capacidade térmica do alumínio. Após chegar à temperatura de fusão são necessários mais 393 kJ/kg antes de o alumínio passar ao estado líquido.

não tem um comportamento ideal durante a fusão, possui certas características que levam a geração de reacções que causam graves problemas, sendo portanto, necessário recorrer a determinados procedimentos que tornem o processo de fusão mais fácil e levem a produtos finais com melhores propriedades. A temperatura elevada, o alumínio reage fácil e rapidamente com o oxigénio levando á formação de óxidos, durante o processo de fusão, quantidade que aumenta com o aumento da temperatura. Como o peso específico das ligas de alumínio é aproximadamente igual ao peso específico dos óxidos, estes misturam-se

facilmente com o metal líquido se não forem tomadas determinadas precauções, sendo por isso necessário impedir ou limitar a agitação do metal líquido.

Outro dos grandes problemas na fusão do alumínio reside no facto de este apresentar uma elevada capacidade na absorção de gases, sendo que o hidrogénio é o que traz mais problemas. Num forno de fusão aberto para a atmosfera a combústivel, o risco de absorção de gases é maior, uma vez que durante o processo de combustão se forma vapor de água. Materiais que contenham hidrogénio na sua composição ou que contenham uma película superficial de sujidade também podem ser responsáveis pela presença do mesmo no banho de metal líquido.

As características do forno e a atmosfera do mesmo são factores importantíssimos a ter em conta. Estudos revelaram que a película de óxidos que cobre a superfície dos metais é importante uma vez que evita a absorção de gases em quantidades elevadas, desde que a película não seja removida ou danificada.

Um problema que normalmente está presente na fusão, quando são usados fornos revérberos de grandes dimensões, é a tendência para a formação de óxidos de elevada dureza na interface do metal e do refractário. Este problema é o responsável pela redução do tempo de vida do forno e do refractário. Estes óxidos de elevada dureza são responsáveis também pela, contaminação do metal e pelo aumento do consumo de combústivel usado na alimentação dos fornos. Estudos revelaram que um forno com capacidade para 50000 lb foi reduzido para 35000lb devido a esses óxidos. Produtos especiais de limpeza são usados na remoção dos óxidos e impedem a formação futuras oxidações nas paredes dos fornos, mas a forma mais económica de evitar todos este problemas reside na implementação de uma política de limpeza. Uma boa política de limpeza deve incluir, supervisão dos métodos e rotinas, formação dos empregados responsáveis pela utilização dos fornos e metal fundido, remoção frequente das escórias que se formam no banho, uso adequado de fluxos e manutenção periódica de todo o equipamento de fusão.

Não existem substitutos para o bom equipamento e para as boas práticas de fusão durante a fusão do alumínio. Bom equipamento é o principal requisito, embora existam processos como a desgasificação, estes não devem ser considerados como a principal solução para remediar as más práticas de fusão.

A fusão inicia-se pelo aquecimento prévio dos fornos, sendo depois feita a alimentação com metal sólido. A alimentação deve ser progressiva uma vez que o metal tem a tendência para expandir estruturalmente podendo danificar o forno e porque o metal no fundo do

carregamento pode aquecer em demasia perdendo algumas das suas propriedades. Após o carregamento do forno ter sido feito e o metal ter começado a fundir, mais metal no estado sólido deve ser introduzido na parte superior, isto para, pré-aquecer os lingotes antes de estes se afundarem no metal líquido. O pré-aquecimento é importante pois ajuda a eliminar a absorção e a humidade presente na superfície dos lingotes. O carregamento deve consistir em lingotes e sucata limpa do mesmo material, sendo que os lingotes podem ser preparados na fundição da empresa ou comprados a empresas especializadas na produção de lingotes de alumínio. Algumas fundições preferem fundir os pedaços de sucata separadamente, para depois analisar a composição e poder realizar as correcções necessárias, se se justificarem, transformando essa sucata em lingotes ou transferindo-as enquanto líquidas para subsequente uso na fundição.

Em geral, não é desejável preparar fusões mistas que incluam alumínio puro, a não ser que sejam tomadas medidas para garantir o peso e composição correcta de todas os materiais envolvidos na fusão. Quando uma fundição produz as suas próprias ligas, o método mais económico é usar lingotes com uma composição extremamente rica. A fundição adiciona lingotes de composição padronizada e elementos de liga, nas proporções indicadas, aos lingotes de composição mais rica de forma a obter a composição ideal para a liga que pretendem obter. Quando se estão adicionar elementos de liga no banho de alumínio líquido, elementos com baixo ponto de fusão, tais como o zinco e o magnésio, podem ser adicionados na sua forma natural, contudo, elementos de liga que possuam um elevado ponto de fusão, tais como o manganês, níquel, silício, titânio, crómio e cobre, tem que ser adicionados sob a forma de uma liga-mãe de composição previamente conhecida. O silício e o cobre podem ser adicionados na sua forma natural, mas a sua dissolução no banho é muito lenta, tendo que se tomar então cuidados especiais. O silício tende a flutuar levando a sua oxidação, reduzindo assim a sua percentagem no banho. Da mesma forma o magnésio também flutua no banho de metal, tendo que se acelerar a sua submersão no banho de forma a evitar a combustão, a formação de escória e a oxidação do mesmo. O fabrico de ligas é normalmente feito em forno de revérbero, sendo operados de forma contínua, através de lotes ou de forma semi-contínua. Se for alimentado através de lotes, quase todo o metal é escoado do forno após cada fusão. Se for usado de forma semi-contínua, o metal líquido é retirado em lotes, sendo alimentado com novas cargas e novamente fundido entre a formação de cada lote. Se for usado de forma contínua, o metal líquido vai sendo retirado e vão sendo adicionadas novas cargas de metal sólido continuamente. A melhor forma de fundir continuamente é ter um forno de câmara

dupla, enquanto de um lado funde, do outro lado vai sendo retirado metal previamente fundido. [Mesquita, 1971]

### **2.5.3.2 Fornos de Fusão e Manutenção**

A escolha dos fornos de fusão usados na fundição deve ter em atenção tanto os factores económicos como os metalúrgicos.

Os factores económicos englobam a eficiência das trocas térmicas, a depreciação do capital, o grau de utilização e ainda os custos de operação, que incluem os custos de manutenção e de exploração, a par de custos de combustível e energia.

Os factores metalúrgicos têm como implicação a tendência da carga para reagir com o meio ambiente, afectando o controlo da composição. As perdas de metal são tanto mais críticas quanto maior for o valor intrínseco do metal.

Os fornos podem ser classificados de inúmeras formas, quanto à qualidade do material que se pretende obter, quanto ao tipo de construção, processo de aquecimento e quanto ao tipo de refractário.

Para a sua descrição neste trabalho serão classificados quanto ao tipo de trocas térmicas, sendo eles:

- Fornos eléctricos
- Fornos de revérbero
- Fornos de cadinho

Os fornos utilizados para a fusão de ligas de alumínio são os fornos de cadinho e fornos de revérbero, sendo estes os que têm maiores capacidades e são alimentados a gás natural por ser mais barato que a electricidade; para a manutenção são mais usuais os fornos eléctricos, uma vez que estes são mais pequenos e mais fáceis de controlar.

A capacidade dos fornos e a velocidade de fusão têm de estar relacionadas com as necessidades do metal fundido e com a regularidade esperada para o vazamento.

## Fornos de cadinho

A liga é colocada num recipiente em material refractário, designado por cadinho, aquecido exteriormente à chama. São fornos mais utilizados para obter pequenas quantidades de líquidos de ponto de fusão não muito elevado, tais como as ligas de alumínio e cobre.

O cadinho é geralmente feito com uma mistura de argila-grafite ou com carboneto de silício. O material utilizado na construção do cadinho é escolhido tendo em conta a liga que se pretende preparar. O material que se pretende fundir não deve dissolver o material do cadinho. Por vezes, utilizam-se também cadinhos de ferro fundido ou de aço, convenientemente revestidos para evitar reacções entre o cadinho e o metal líquido. Para aquecimento dos cadinhos utilizam-se combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos.

Outros factores que influenciam na escolha do material do cadinho são:

- A temperatura de fusão do material que se vai preparar
- O rendimento térmico que se pretende obter

Para evitar o contacto dos gases de combustão com o metal líquido e as consequentes absorções de gases e formação de óxidos, é conveniente cobrir este ou com substâncias protectoras que flutuem no metal ou com uma tampa a cobrir o cadinho.

Este tipo de forno pode classificar-se quanto ao tipo de construção como:

- Cadinho móvel
- Cadinho fixo (Fig. 32)
- Cadinho basculante
- Cadinho rotativo (Fig. 31)

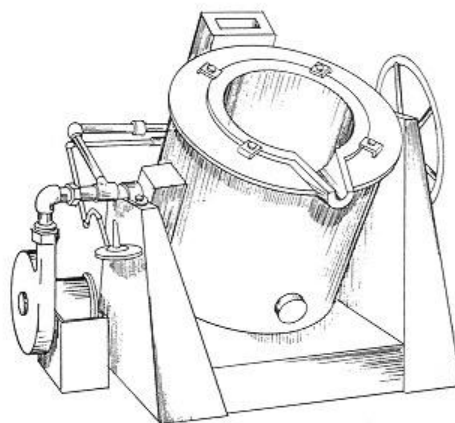


Fig. 31 – Forno de cadinho que permite a rotação para facilitar o vazamento

Devemos ter em atenção o facto de que não se deve utilizar o mesmo cadinho para a preparação de ligas diferentes, pois apesar da limpeza efectuada após a preparação de uma determinada liga permanecem sempre resíduos, correndo o risco da liga conter os elementos existentes da operação anterior.

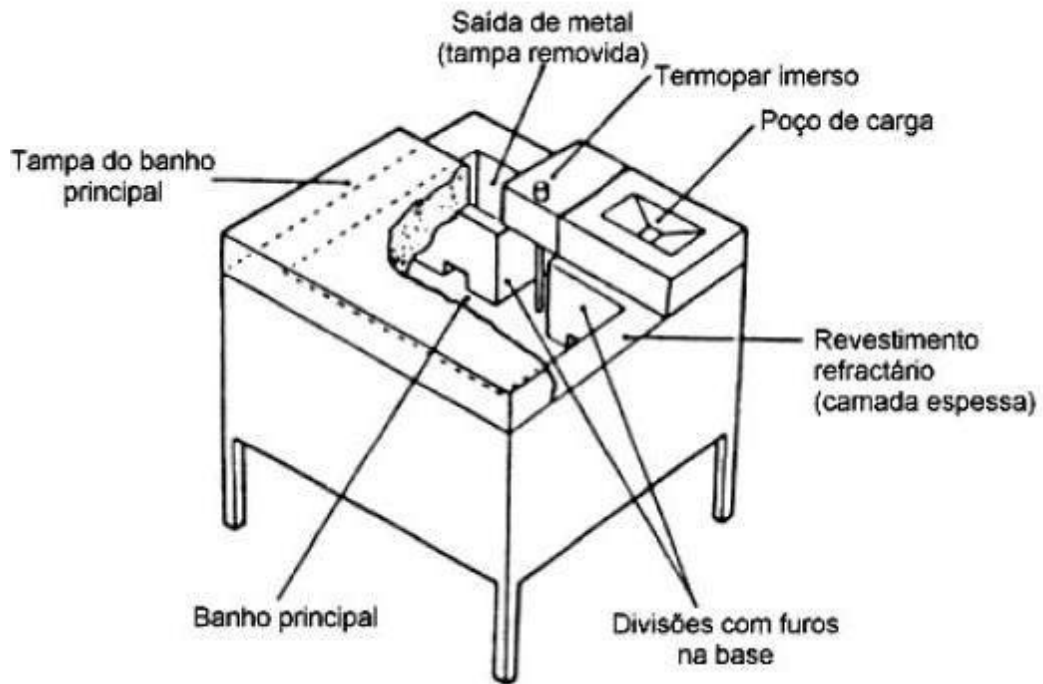


Fig. 32 – Forno de cadinho fixo para ligas de alumínio

## **Fornos de Revérbero**

O metal líquido fica sobre a soleira do forno, sendo aquecido por reflexão do calor na abóbada deste e por contacto directo com os gases de combustão.

Utilizam-se cada vez menos para obter aço vazado e ferro fundido branco, embora se empreguem também para a fusão de grandes quantidades de ligas de cobre e mesmo de alumínio.

Os combustíveis mais utilizados nestes fornos são os gasosos. Também se utilizam bastante os líquidos e até o carvão pulverizado. São fornos de instalação inicial económica, visto que utilizam combustíveis baratos, tais como o carvão e petróleo bruto.

Nestes fornos (Fig. 33), como referimos anteriormente, os produtos fundidos estão em contacto com os gases de combustão o que tem como inconvenientes o facto de incorporar no material impurezas dos combustíveis e o de serem atacadas pelos gases de combustão.

Nestas condições não é fácil regular a composição do produto fundido e as peças não ficam com a garantia das características desejadas, portanto não é aconselhável para a obtenção de peças de responsabilidade.

Apresentam um rendimento calorífico baixo, porque o calor é transmitido aos produtos a fundir quase exclusivamente por irradiação; por isso este tipo de fornos só é utilizado na fundição de produtos ferrosos quando a produção não justifica a instalação de outro tipo.



**Fig. 33 – Forno de revérbero basculante**

### **Fornos eléctricos**

Os fornos eléctricos são muito utilizados tanto na fusão como na manutenção de ligas de alumínio.

Podem classificar-se como:

- Fornos eléctricos de indução
- Fornos eléctricos de resistência

### **Vantagens dos fornos eléctricos**

Este tipo de forno permite obter produtos de elevada pureza, são económicos, como também permitem uma fácil regulação da temperatura conseguindo-se atingir temperaturas elevadas.

### **Inconvenientes dos fornos eléctricos**

Têm como principal inconveniente o custo inicial de instalação, uma vez que obrigam à instalação de acessórios dispendiosos.



### Fornos eléctricos de indução

Usam-se quer para ligas ferrosas, quer para fundir outras ligas, nomeadamente às de cobre e de alumínio. Este tipo de fornos garante uma grande fiabilidade e controlo das ligas elaboradas.

Na maioria dos casos, são fornos de cadinho aquecidos por efeito de correntes induzidas. Empregam-se frequentemente quando se pretende obter ligas de composição muito bem definida, por não haver as alterações da composição que resultam geralmente do contacto com os gases de combustão, quando o aquecimento é produzido pela chama de qualquer combustível.

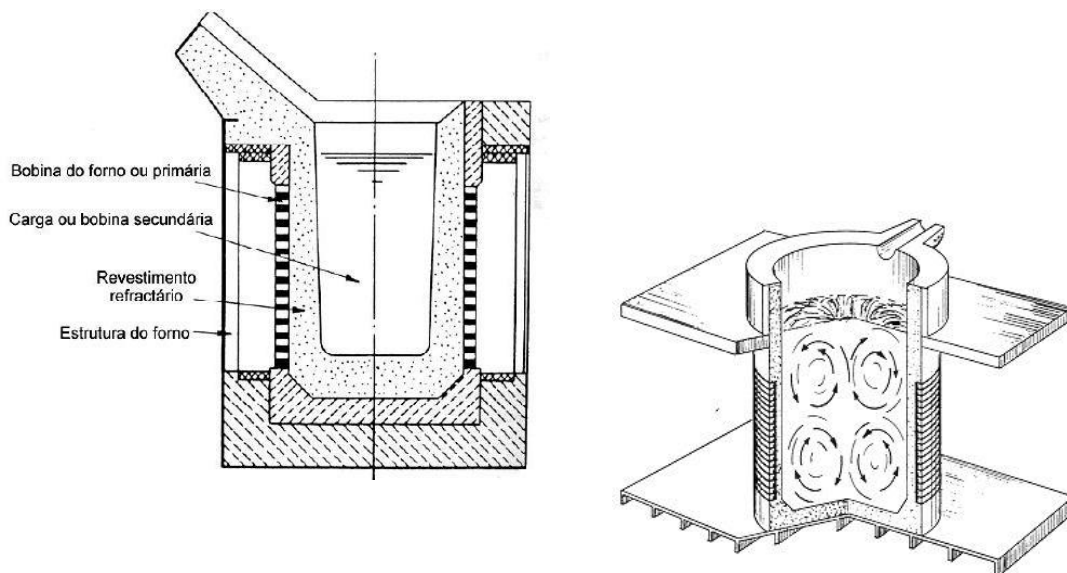


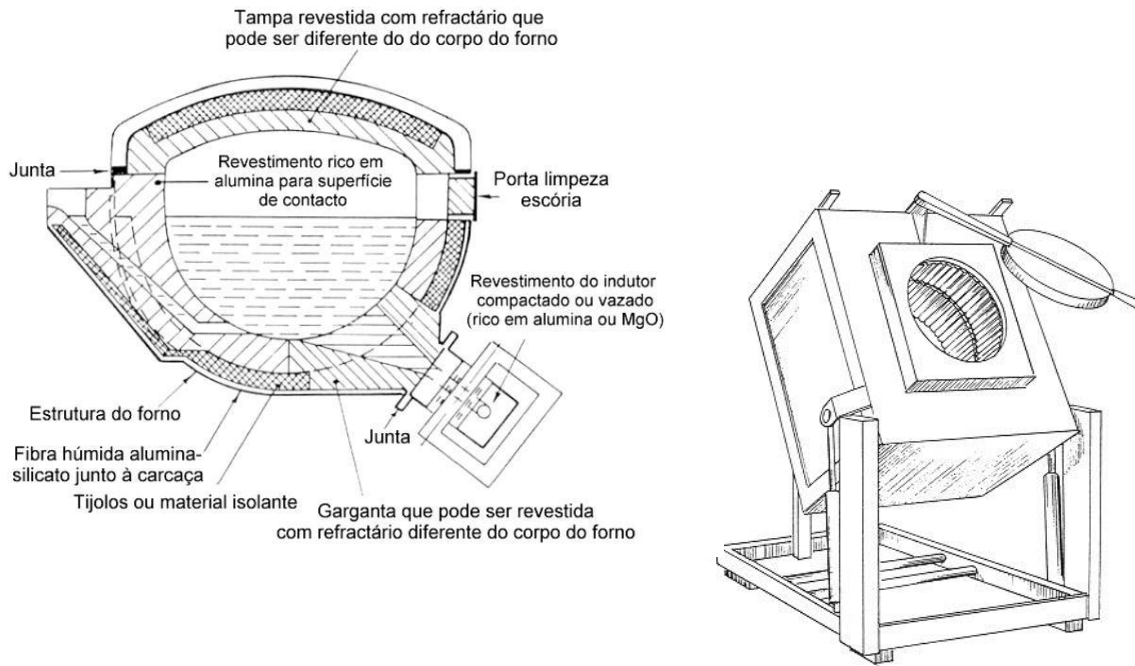
Fig. 34 – Forno de indução sem núcleo

Estes fornos (Fig. 34) são constituídos por uma bobina primária refrigeradora por circulação de um fluido, a qual funciona como o primário de um transformador gerando correntes induzidas no secundário que é o metal ou liga que vai ser fundido.

Este tipo de fornos divide-se em:

- Fornos de indução de baixa frequência – (frequência da rede eléctrica – 50 Hz)
- Fornos de indução de média frequência – (frequência de aproximadamente 500 Hz)
- Fornos de indução de alta frequência – (frequência acima dos 500 Hz)

Existem ainda fornos de indução de canal (Fig. 35) em que o aquecimento do metal em fusão é feito por indução apenas no interior de canais acoplados à base do forno. O metal, depois de aquecer dentro do canal, fica menos denso e por convecção sobe dando lugar a outro metal mais frio do banho metálico em fusão.



**Fig. 35 – Forno de indução por canal**

Este tipo de fornos eléctricos tem a vantagem de não necessitar de tanta energia eléctrica para manter o metal em fusão.

### **Fornos eléctricos de resistência**

Utilizam-se mais como fornos de manutenção, isto é mantêm o metal fundido à temperatura de vazamento, do que como fornos de fusão. Geralmente, destinam-se a aquecer cadinhos para produzir pequenas quantidades de metal líquido de baixo ponto de fusão.

Estes fornos são constituídos por uma ou duas resistências eléctricas que aquecem por efeito de Joule e transmitem o calor gerado por condução ou por radiação até ao metal a fundir.

### 2.5.3.3 Efeito da Temperatura e dos Tempos de Espera

Durante a preparação de fusões, é importante evitar temperaturas e tempos de espera elevados, em geral, a transferência de metal quente deve ser feita a temperaturas tão baixas quanto possível, dentro dos limites possíveis. Esta é uma das práticas mais importantes na fusão de metal. Temperaturas e tempos de espera elevados levam à obtenção de peças com fracas propriedades mecânicas, aumentando também as hipóteses de absorção de gases e formação de escória. As fusões não devem ultrapassar temperaturas da ordem dos 760 °C. A temperatura do alumínio tende a aumentar rapidamente após se ter obtido uma fusão completa de todo o material presente no forno, levando a um sobreaquecimento do metal, o que se traduz em propriedades muito fracas. Precauções adequadas devem ser tomadas de forma a prevenir que o calor residual presente no forno eleve a temperatura do metal fundido acima dos parâmetros desejados. A melhor maneira de se evitar este problema é equipar o forno com equipamentos automáticos que avisem o operador da total fusão do metal. Controladores automáticos de temperatura também ajudam na minimização deste problema.

Como já foi referido anteriormente, as práticas de fundição que são seguidas afectam a qualidade das peças obtidas no final, independentemente do metal usado. Contudo, algumas ligas de alumínio são mais vulneráveis que outras. É fundamental estar familiarizado com os princípios químicos e físicos da fusão das várias ligas de alumínio e saber de que forma estas alteram a operação de fundição. As características físicas e químicas da fusão das ligas de alumínio incluem:

- A facilidade com que o alumínio fundido se combina com o oxigénio, humidade ou outros elementos oxidantes de forma a produzir escória e a facilidade com que a escória se mistura com o material fundido.
- A rapidez com que o alumínio absorve o hidrogénio e a forma que este teor aumenta durante a solidificação produzindo porosidades nas peças finais.
- A contracção volumétrica, que varia de 6.5 a 8.5%, que ocorre quando o metal solidifica e arrefece.
- A baixa densidade do alumínio, que resulta numa baixa pressão hidrostática na moldação. Isto, combinado com o processo de contracção durante a solidificação, necessita de cuidados especiais de forma a evitar defeitos de contracção na obtenção das peças finais.

- O elevado grau de protecção que a película de óxidos proporciona contra absorção de gases, torna essencial que essa película não seja quebrada pela agitação ou turbulência durante a operação de fusão e vazamento.
- A tendência que o metal apresenta a fracturar ou a fissurar durante e após a solidificação. Isto deve-se essencialmente a más práticas de fundição, mas em certas ligas pode ser agravado pela presença de impurezas no processo de fusão.
- A rapidez com que a corrosão ataca a superfície dos metais.
- O alumínio é reduzido a partir da alumina. Muitos fornos são revestidos com um refractário rico em alumina. Quantidades apreciáveis de criolite e fluoretos aceleram a reacção do alumínio com estes refractários causando problemas nefastos.

[Mesquita, 1971]

#### **2.5.3.4 Formação de Escória**

Quando o alumínio reage com a atmosfera ou humidade, tem a tendência para a formação de escória, com óxidos de alumínio e nitretos, contendo gases na sua composição. Como a escória é molhada pelo alumínio e tem aproximadamente a mesma densidade, normalmente entranha-se no banho fundido, durante o manuseamento ou a fundição.

A quantidade de escória que se forma durante a fusão do alumínio aumenta com:

- O uso de sucata incorrectamente limpa.
- A presença de magnésio nas cargas que alimentam a fusão.
- O aumento da turbulência, que faz com que a película de óxidos que protege a superfície do metal se quebre.
- O aumento da temperatura dos gases que estão em contacto com a superfície do metal.

Os óxidos presentes na superfície do metal, contêm uma quantidade considerável de metal líquido, o que faz com que a camada de escória fique molhada. Este tipo de formação de escória é a principal responsável pela perda de metal durante a fusão. Defeitos provocados pela escória na fundição resultam de más práticas de fusão, manuseamento ou de vazamento.

Podem ser reduzidas através da:

- Produção de fusões substancialmente livre de partículas suspensas ou de películas de escória.
- Redução da turbulência, que faz com que os filmes de óxidos que protegem a superfície dos metais não se quebrem.
- Utilização de boas práticas de manuseamento.

[Mesquita, 1971]

### 2.5.3.5 Afinação de Grão

A afinação de grão melhora a fissuração a quente, reduz os efeitos prejudiciais das porosidades causadas pelos gases (dando origem a peças mais compactas), e redistribui a porosidade nas ligas de alumínio. O tamanho de grão de uma liga está dependente do número de núcleos presentes no metal, uma vez que este se começa a solidificar com base na taxa de arrefecimento. Um arrefecimento rápido promove um tamanho de grão de dimensões mais reduzidas.

A adição de certos elementos, ao alumínio, origina núcleos para o crescimento de novos grãos. O titânio, particularmente associado ao boro, tem um poder de nucleação elevado sendo por isso um dos principais refinadores de grão. A adição de titânio, entre 0.02-0.15%, pode ser usada, mas o efeito que provoca dura apenas 40 minutos, portanto se se adicionar boro obtém-se grãos mais pequenos e o efeito dura bastante mais tempo. A adição de titânio e de boro pode ser feita como uma liga-mãe ou como fluxo. A maioria das fundições usa fornos de fusão e manutenção de pequenas dimensões, pelo que uma aplicação continua é impossível, o que faz com que o titânio e o boro sejam aplicados sob a forma de cargas. A adição sob a forma de uma liga-mãe tem maiores benefícios do que sob a forma de fluxo, mas devido ao baixo custo e facilidade de aplicabilidade deste o afinamento de grão é maioritariamente feito sob a forma de fluxo. O teor de silício presente na liga afecta o efeito refinador do titânio e do boro. Ligas com elevado teor de silício requerem adições de elevada concentração.

Tabela 15 - Adição de Ti para o refinamento das ligas Al-Si

<i>Si content of alloy (%)</i>	<i>Ti addition (%)</i>
4-7	0.05-0.03
8-10	0.03-0.02
11-13	0.02-0.01

A maior parte das soluções salinas utilizadas neste processo tem uma elevada tendência hidroscópica, fazendo com que a probabilidade de surgir hidrogénio no metal aumente consideravelmente, é por isso usual proceder á desgasificação do banho durante ou após a adição das soluções salinas.

**Tabela 16 – Fluxos nucleantes**

NUCLEANT	Form	Alloys treated	Application rate (%)	Remarks
2000	50 g tablets	All Al casting alloys including those with Mg	0.15–0.25	Strong grain refinement from Ti:B 6:1
70	30 g tablets	All Al casting alloys including Al–Mg alloys	0.06–0.08	Low fume similar to NUCLEANT 2000
70SS	75 g tablets	ditto	ditto	Self-sinking tablets
TILITE 101	500 g tablets	Bulk-melted Al wrought and casting alloys	0.0125–0.015	Large self-sinking tablets for the bulk melter Ti:B 10:1 one tablet can refine up to 200 kg of alloy

### 2.5.3.6 Modificação

A composição da liga e o tipo de processo de fundição que irá dar origem a uma determinada peça afectam a microestrutura, bem como a adição de determinados elementos que podem ter como efeito uma melhoria da maquinabilidade, das propriedades mecânicas e das propriedades de fundição

As peças obtidas pelos processos de fundição em areia e moldações permanentes arrefecem lentamente, dando origem a uma estrutura lamelar eutética grosseira que é prejudicial às características mecânicas da peça vazada. A alteração da composição por forma a alterar a microestrutura é denominada como modificação estrutural (Fig. 36). A adição de sódio ou estrôncio modifica a microestrutura dando origem a uma malha de fibras eutéticas, refinando a malha grosseira tornando-a numa estrutura fina de textura sedosa. Esta mudança é acompanhada de uma melhoria considerável das propriedades mecânicas da liga. [DTM / E. Thiberge, 2006][Campbell, Castings, 2003] [Brown, Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, 2000]

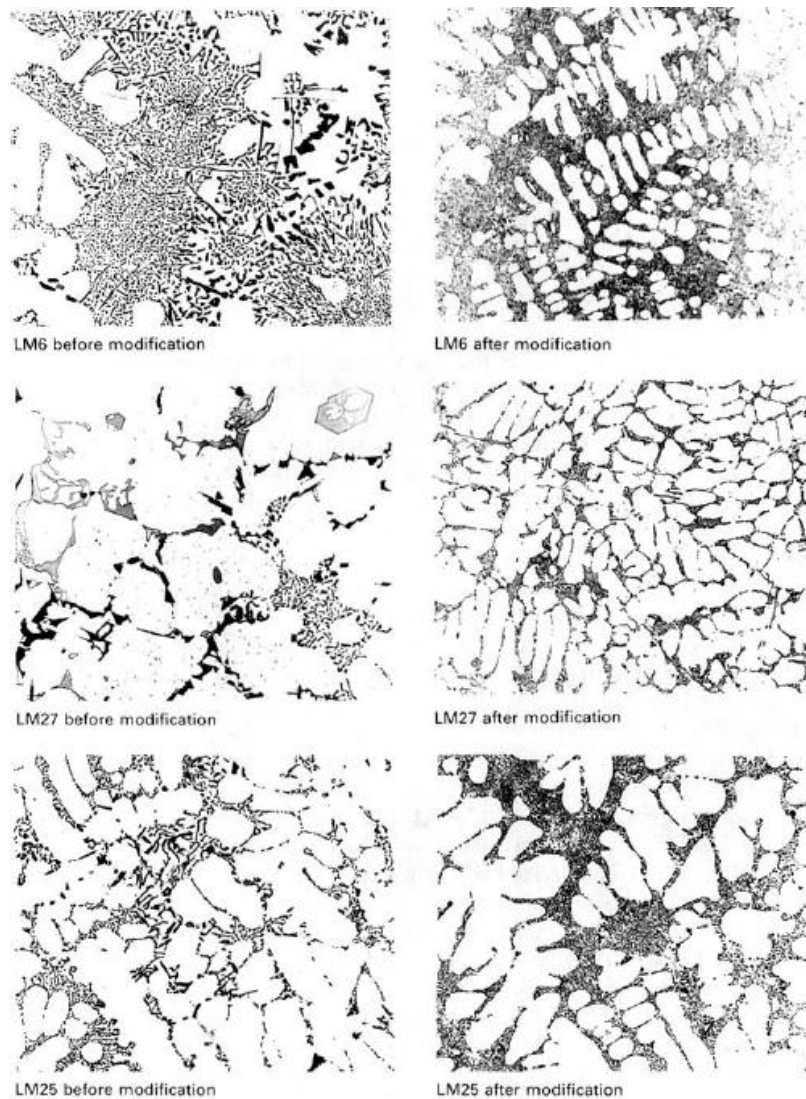
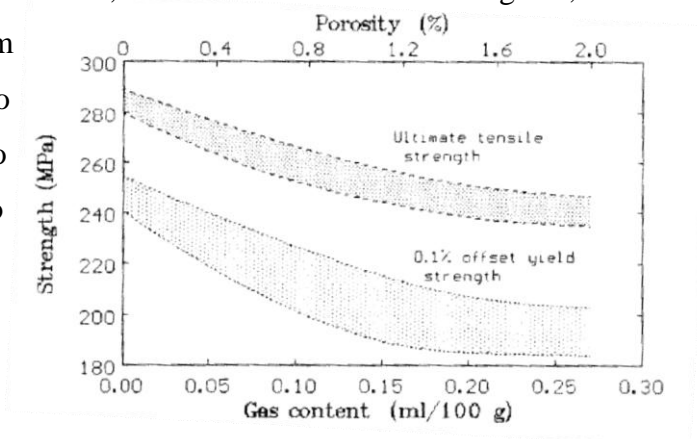


Fig. 36 – Efeito da modificação estrutural na microestrutura de algumas ligas

A modificação aumenta a resistência à fissuração a quente por um lado e reduz a tendência aos rechupes. Peças obtidas pelo processo de fundição injectada arrefecem de forma mais rápida tendo portanto uma microestrutura estéctica fina com dendrites de dimensões reduzidas. Quanto maior o teor de silício presente na liga, maior terá que ser o teor do elemento responsável pela modificação. Quanto maior for a taxa de arrefecimento menor terá que ser o teor do mesmo elemento modificador. Os primeiros modificadores hipoeutéticos tinham por base o sódio sendo que continuam a ser bastante utilizados, embora o seu efeito modificador se desvaneça com o tempo, podendo dar origem a problemas de controlo estrutural. [Brown, Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, 2000]

### 2.5.3.7 Presença de Hidrogénio

Líquidos, incluindo metais líquidos, podem absorver grandes quantidades de gás sob determinadas condições. Durante a fusão, o metal está rodeado de gases, incluindo o hidrogénio. Estes gases têm origem na atmosfera que rodeia a fusão e no processo de combustão, podendo mesmo penetrar nas paredes do forno de fusão. O hidrogénio dissolve-se fácil e rapidamente no metal líquido ficando a fazer parte da composição química do metal.



Quando o metal é vazado num molde arrefece rapidamente, então, o

Fig. 37 – Propriedades mecânicas em função do conteúdo de gás, liga de alumínio A356.

metal já não consegue manter na sua composição a mesma quantidade de gás que tinha quando estava na fase líquida, o que leva a produção de bolhas, que têm tendência a subir escapando para a atmosfera. Como o metal solidifica rapidamente nem todo o gás consegue sair da moldação ficando aprisionado sob a forma de bolhas levando à criação de porosidades. Na figura 37 a variação das propriedades mecânicas em função do conteúdo de gás presente.

Apenas gases no seu estado atómico se dissolvem no metal líquido, quando dois átomos se combinam formam uma molécula e o gás e então o gás escapa através do metal, podendo mesmo assim ficar aprisionado devido à rápida solidificação do metal. O gás que acarreta mais problemas nas ligas de alumínio é o hidrogénio.

As principais fontes de hidrogénio são:

- A atmosfera do forno de fusão
- Humidade presente nos refractários, ferramentas e sucatas incorrectamente limpas.
- Fluxos húmidos
- Óleos e hidróxidos presentes no sódio que é usado para modificar a estrutura das ligas de alumínio-silício.



A equação que traduz a presença de hidrogénio é:

Tabela 17 – Equação química que traduz a presença de hidrogénio

$3\text{H}_2\text{O} + 2\text{Al} \rightarrow 6\text{H} + \text{Al}_2\text{O}_3$	
$3\text{H}_2\text{O}$	Vapor de água
$2\text{Al}$	Alumínio
$6\text{H}$	Hidrogénio
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio

O vapor de água que está contido num centímetro cúbico de ar é o suficiente para contaminar uma tonelada de metal. A temperatura do metal líquido determina a quantidade de hidrogénio absorvido.

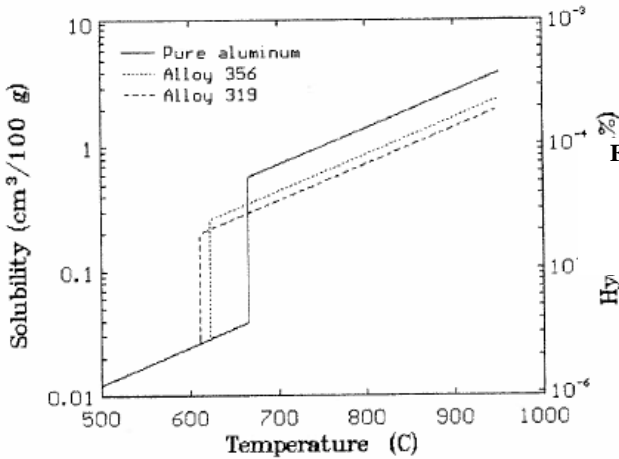
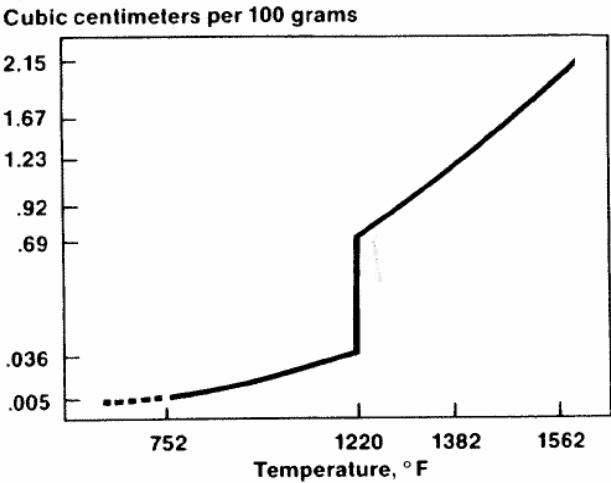


Fig. 38 – Gráfico Solubilidade vs. Temperatura vs. % de hidrogénio

Fig. 39 – Influência da temperatura na solubilidade do hidrogénio



### 2.5.3.8 Desgasificação

Existem mais alguns processos, além da desgasificação, para o tratamento do alumínio, mas a desgasificação é de longe o processo mais usado o que torna todos os outros praticamente irrelevantes.

Fundamentalmente, a desgasificação (Fig. 40) consegue-se por via mecânica ou química, sendo que na maior parte dos casos se considere mista.

A acção mecânica está sempre presente qualquer que seja o agente desgasificante, sendo mecânica pura quando se usam gases inertes muito puros, como o Árgon ou o Azoto. Neste caso, o gás injectado por meio de um tubo com dispersor sai em pequenas e numerosas bolhas, pelo que o hidrogénio difunde para as zonas onde a sua pressão de vapor é nula, ou seja, para as bolhas de Árgon. Este tipo de desgasificação, se bem que possa ter pouca eficiência, não conduz a reacções secundárias que se traduzem por perdas de elementos em solução, nem tão pouco é poluente. A desgasificação por via química pura não é possível, sendo portanto considerada como tal a acção químico-mecânica.

Neste caso além de ser facilitada a difusão do  $H_2$  para as bolhas gasosas, segundo alguns autores impede-se a formação de um óxido na interface bolha-metal, possível de existir no processo puramente mecânico em virtude da presença inevitável de resíduos de  $H_2O$  ou  $O_2$  nos gases inertes. O aumento da difusibilidade do hidrogénio para as bolhas é provocado pela reacção química que tende a dar-se.

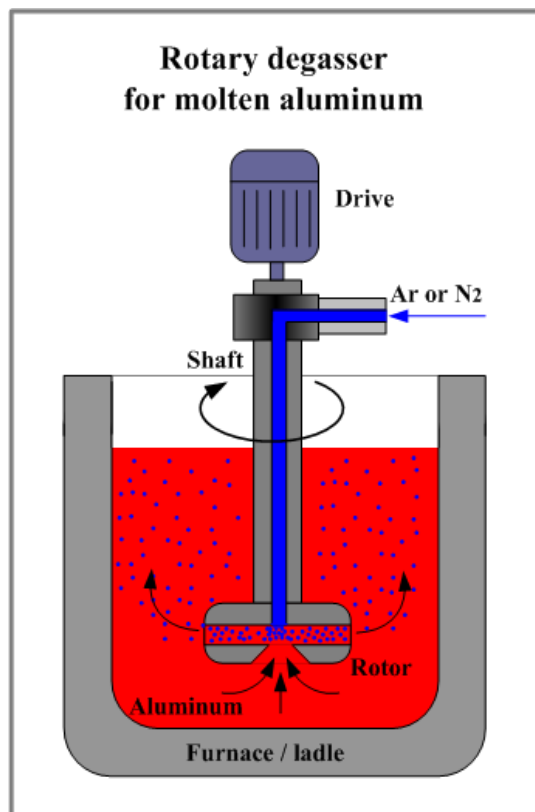


Fig. 40 – Esquema da desgasificação rotativa

### Tipo de Gás Usado

Antigamente, o gás usado para a desgasificação do hidrogénio era o cloro, normalmente sob a forma de Hexacloroetano ( $C_2Cl_6$ ), mas uma vez que a reacção química formava compostos tóxicos prejudiciais á saúde dos operários e tinha um efeito corrosivo na superfície das peças, começou-se a colocar de parte o seu uso. Hoje em dia para a desgasificação do alumínio usa-se árgon ou azoto, gases inertes, o que significa que estes gases não apresentam reacção com o alumínio líquido. Um dos benefícios do uso de gases reactivos é a taxa de remoção do hidrogénio, os cloretos que se formam modificam a tensão superficial do alumínio, fazendo com que as inclusões de óxidos sejam retiradas do banho pelas bolhas, flutuando para a superfície do banho. Os gases inertes também conseguem produzir este efeito, em menor escala, efeito que é acentuado pelo uso de gases reactivos. As vantagens do uso de gases reactivos nem sempre são claras, por vezes o uso destes gases produz uma melhor desgasificação, outras vezes parecem dificultar o processo. Se as bolhas criadas forem de grandes dimensões e o processo de desgasificação tiver uma eficiência reduzida (veio de grafite), uma melhoria na remoção do hidrogénio é notada. Se as bolhas forem de pequenas dimensões e o processo de desgasificação tiver uma grande eficiência (veio rotativo), há evidências que os gases reactivos desaceleram o processo de remoção do hidrogénio. Os gases reactivos não devem ser utilizados num banho que tenha sido modificado com estrôncio ou sódio. A desgasificação deve ser feita primeiro que a modificação estrutural do banho, se forem usados gases reactivos. Vários gases e misturas de gases têm sido usados para remover o hidrogénio e os óxidos presentes no alumínio fundido: cloro, nitrogénio, árgon, 90% de nitrogénio e 10% de cloreto, 95% de nitrogénio e 5% de fréon-12, 95% de árgon e 5% de fréon-12, 80% de nitrogénio 10% monóxido de carbono e 10% cloro. O gás mais reactivo é o cloro, mas é o melhor gás para remover o hidrogénio do alumínio líquido. O gás reactivo, hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ) tem recentemente sido usado para a desgasificação do alumínio.

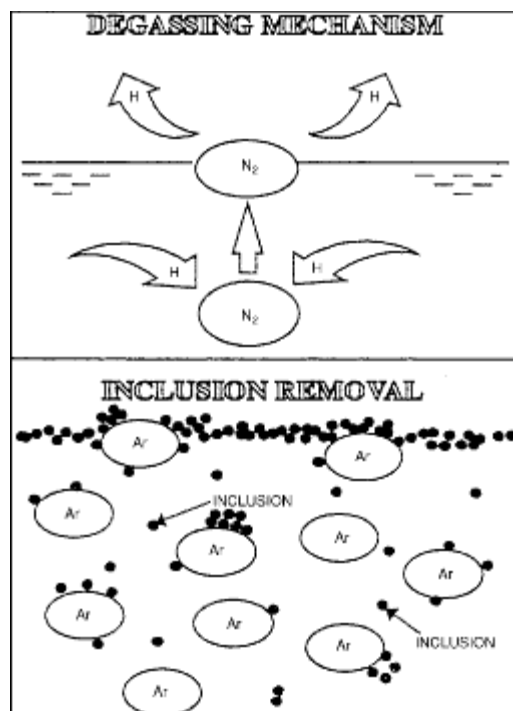


Fig. 41 – Esquema do mecanismo de desgasificação e da remoção de inclusões

O cloro tem duas vantagens, mecanicamente, cria bolhas de baixa pressão, que removem hidrogénio e outras impurezas. Quimicamente, forma cloreto de alumínio que vai molhar inclusões não-metálicas fazendo com que estas flutuem até á superfície do banho, ao contrário do azoto, que já não possui esta capacidade. Experiências demonstraram que o árgon tem um efeito igual ao do azoto. O cloro é mais eficiente que o árgon ou o azoto, contudo, é um gás tóxico, que sem um controlo apertado, polui a atmosfera. O cloro também reage rapidamente como magnésio, removendo-o, reacções que acontecem em ligas que possuem grandes quantidades de magnésio, tudo isto dependendo do tempo de reacção. Devido a estas propriedades, o seu uso tem sido reduzido e substituído pelo uso de misturas gasosas de 10% de cloro e 90% de azoto ou por 10% de cloro e 90% de árgon.

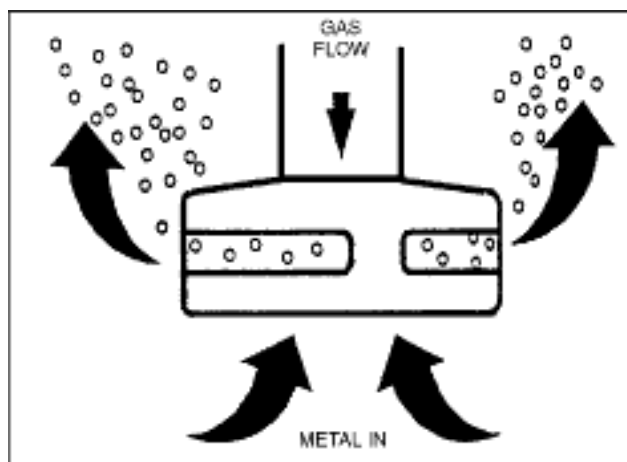


Fig. 42 – Esquema de degasificação

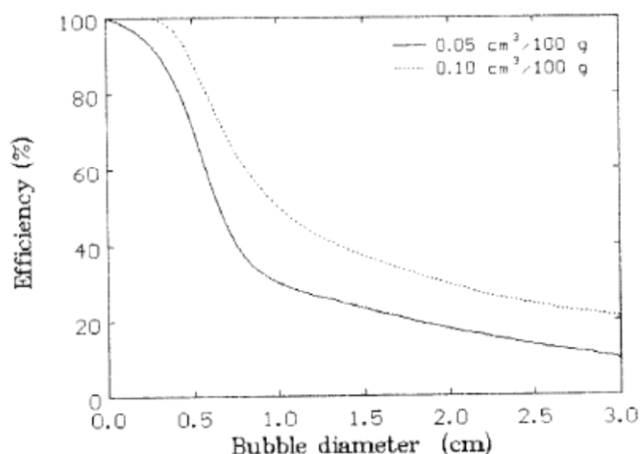


Fig. 43 – Remoção do hidrogénio em função do diâmetro das bolhas. Resultados para dois tratamentos que variam na concentração do gás usado.

De forma a assegurar que o metal líquido que vai entrar na cavidade do molde está livre de películas de óxidos e de outras partículas não-metálicas, muitas fundições usam fibra de vidro e núcleos coadores em sistemas de vazamento. Este tipo de soluções tem tido sucesso na remoção de óxidos de elevada densidade, mas não na remoção de óxidos menos densos.

Para remover partículas não-metálicas que possam entrar na corrente de metal líquido que é vazado no molde, têm sido usado um filtro cerâmico.

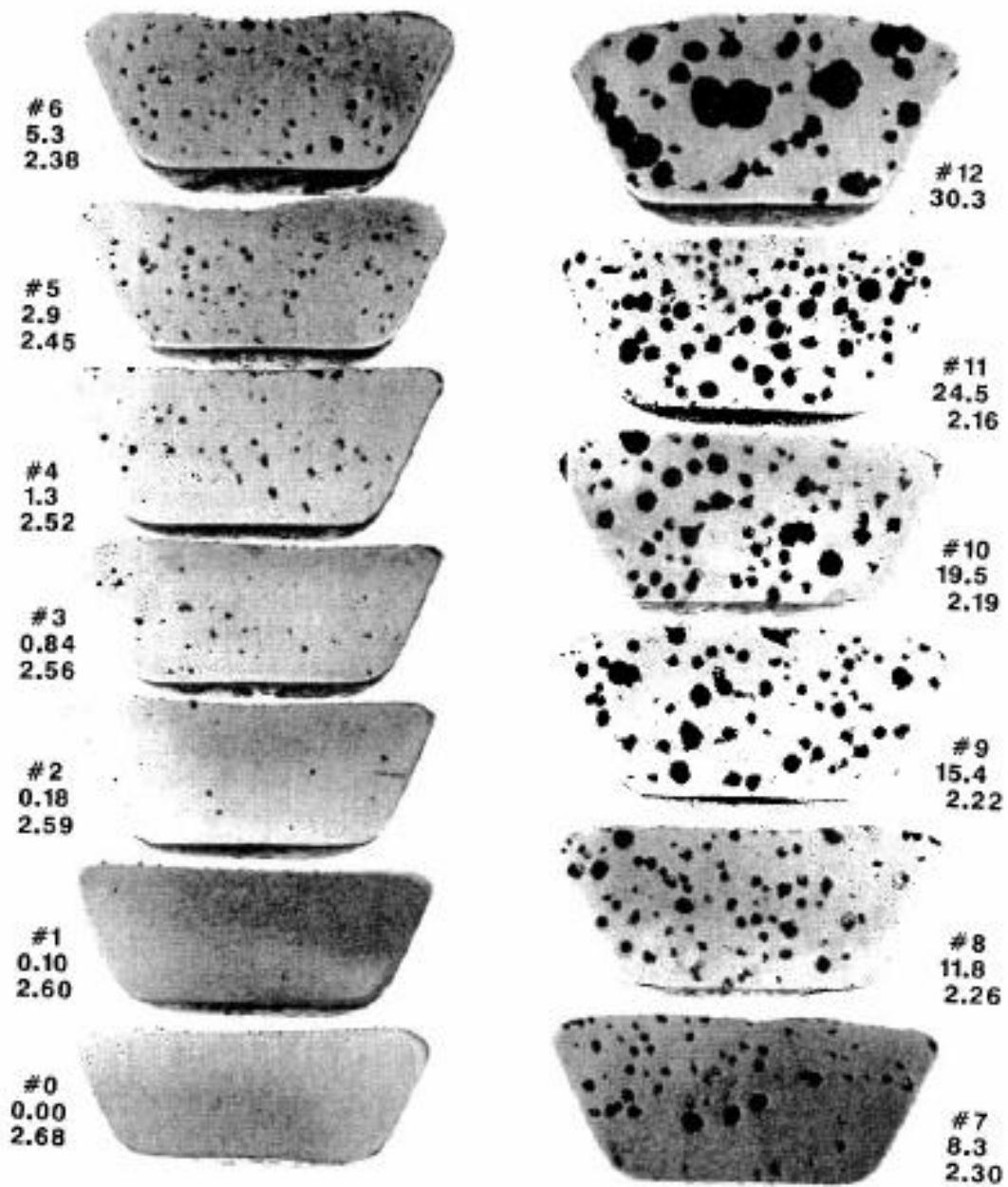


Fig. 44 – Comparação da liga A356.0 vazada sob 100mm de pressão, que pode ser usada para controle da porosidade. O número do centro indica a percentagem de área com poros, o número inferior indica a densidade.

[Campbell, Castings Practice: The 10 Rules of Castings, 2004] [Campbell, Castings, 2003]  
 [Mesquita,1971]

### 2.5.3.9 Fluxos

Cada vez mais as fundições têm utilizado fluxos de forma a assegurar as melhores propriedades físicas e mecânicas dos metais. Existem muitos fluxos á disposição no mercado de forma a melhorar a qualidade dos produtos e ao mesmo tempo reduzindo nos custos de produção.

Os fluxos dividem-se em quatro classes:

- Fluxos de cobertura – são usados para prevenir a acumulação de gases e para reduzir a formação de escória por oxidação, reduzindo assim a perda de metal.
- Fluxos de limpeza – são usados para remover inclusões sólidas não-metálicas.
- Fluxos de desgasificação – são adicionados ao metal para remover gases, especialmente o hidrogénio, que contribuem para a formação de porosidades.
- Fluxos de escória – são usados para recuperar metal que se perdeu com a formação de escória.

Fluxos especiais incluem, fluxos que removem as impurezas, refinadores de grão e fluxos próprios que ajudam na formação de ligas.

Não existe um fluxo universal, porque existem demasiadas variáveis na hora de escolher um fluxo. A composição e a utilização final do metal são dois dos factores que mais contribuem para a escolha dos ingredientes do fluxo ideal. Um fluxo que é considerado como ideal para uma liga de alumínio, pode não ser o indicado para outra, uma vez que as taxas de oxidação variam de liga para liga. A fusão e as temperaturas de fundição também afectam a composição do fluxo. O tipo de forno usado na fusão do metal, forno de indução, forno de revérbero ou outro, podem requerer que se use um determinado tipo de fluxo.

### **Fluxos de cobertura**

Os fluxos de cobertura formam uma espécie de lençol líquido, e são usados principalmente para reduzir a oxidação e para prevenir a absorção de gases. Uma mistura de cloretos é considerada como um fluxo de cobertura, normalmente encontrados a preços relativamente razoáveis. Este tipo de fluxos não apresenta uma taxa de sucesso muito elevada, uma vez que não tem capacidade para molhar as impurezas não-metálicas, que se encontram em suspensão no banho de metal líquido. Apenas através de um longo tempo de espera ou através do uso de fluxos de limpeza se consegue remover facilmente essas impurezas. Algumas pessoas pensam que os fluxos de cobertura são responsáveis pela elevada perda de material, o que se verifica incorrecto. A quantidade de metal que se perde no processo de fusão depende da atmosfera do forno, da viscosidade e do ponto de fusão do fluxo. Se as condições forem as correctas e se o fluxo usado tiver a composição correcta, a perda de metal se verifica é extremamente reduzida. Por vezes, quando os fluxos líquidos permanecem no banho durante um largo período de tempo, entram em contacto com metal sujo, levando a um aumento de espessura. A escória que se forma tende a acumular glóbulos de alumínio. Por último, forma-se uma camada de escória e metal, camada que seria ainda maior se não fosse usado um fluxo de cobertura. Uma solução usada para este tipo de problemas, consiste na adição de um segundo tipo de fluxo, que através de uma reacção exotérmica, quebra a camada sólida fazendo com que o metal se liberte e misture novamente no banho. Ao mesmo tempo, uma fina camada

Fluxos de sais não higroscópicos são usados de durante e após a fusão de forma a reduzir as perdas de metal. Estes fluxos consistem em misturas de fluoretos. Um típico fluxo salino contém em partes iguais cloreto de potássio e cloreto de sódio, com adições de 10% de criolite ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) ou de fluoreto de sódio. Tais fluxos são denominados como fluxos de escória.

### **Fluxos de limpeza**

Quando a acção de limpeza e de protecção são importantes, são adicionados fluoretos aos fluxos de cobertura. Ao fazer isto forma-se um fluxo líquido que possui excelentes propriedades de limpeza. Os fluoretos molham as partículas suspensas ou as películas de óxidos de alumínio, fazendo com que estas flutuem até á superfície. Ao usar fluoretos é possível produzir metais com excelentes propriedades, a partir de cadinhos ou fornos de

revérbero. Se a camada de escória se tornar mais espessa e pegajosa, metal que esteja preso nessa escória pode ser recuperado usando fluxos de escória.

### **Fluxos de desgasificação**

Os fluxos desgasificantes são introduzidos sob a forma de pastilhas, compostos por produtos químicos que se decompõem termicamente, libertando bolhas. Este método é o menos controlável, uma vez que as pastilhas se decompõem rapidamente, sendo necessário, por vezes, vários tratamentos para se conseguir uma reacção suficientemente longa. A maior parte dos desgasificantes químicos contém na sua composição cloro, pelo que um dos mais comumente utilizados é o hexacloroetano ( $C_2Cl_6$ ). Como todos os fluxos sólidos, estes materiais são higroscópicos e devem ser mantidos numa atmosfera seca, caso contrário em vez de retirar hidrogénio dos banhos de fusão vai acrescentar mais hidrogénio.

Fluxos sob a forma de um pó podem ser adicionados ao banho de metal fundido usando como “transporte” um gás inerte (árgon ou azoto). Estes fluxos são adicionados através de um tubo imerso, sendo assim possível fazer chegar o fluxo á parte inferior do banho, reagindo com o metal até chegar á superfície. Fluxos sob a forma de um pó podem desgasificar, remover inclusões não-metálicas e funcionar como modificadores e/ou refinadores de grão.

### **Fluxos de escória**

Frequentemente, a composição da liga, os fornos de fusão e as especificações do produto são tais que não obrigam o uso de fluxos de cobertura ou de limpeza, a simples aplicação de um fluxo de escória é o suficiente, impedindo a perda excessiva de metal. Este tipo de fluxos são exotérmicos, libertando calor quando em contacto com cargas metálicas que contêm impurezas, reagindo também com a camada de escória que se forma na superfície do banho. Através destas reacções libertam o metal que está misturado com a escória, reduzindo-a a uma fina camada que é posteriormente retirada. O uso correcto destes fluxos reduz as perdas de metal de 85% para uns meros 15%. A reacção ocorre por oxidação de uma pequena percentagem de alumínio livre na escória, o alumínio arde, libertando uma quantidade de calor suficiente para fundir todo o restante alumínio presente na escória. Esta matéria fundida passa através dos poros da escória e junta-se de novo ao banho de metal líquido. Cerca de 5% do metal presente na escória arde, recuperando aproximadamente 85% do metal aprisionado sem necessidade de recorrer a outros processos, equipamento especial



ou tratamentos. A determinação sobre que fluxo se deve usar é baseada em três princípios, na composição da liga, no processo de vazamento e na aplicação final da liga. [Mesquita, 1971]

## 2.5.4 Liga Usada pela STA para Puxadores

### 2.5.4.1 AlMg4Zn

O magnésio é um elemento de liga bastante comum das ligas de alumínio, é normalmente adicionado às ligas Al-Cu, Al-Si, Al-Zn, de forma a ser possível efectuar os tratamentos térmicos, ou pelo menos melhorar a resposta destas ligas aos tratamentos. Nestas ligas o magnésio não é o elemento de liga principal. Existe contudo um grupo de ligas em que o é. Ironicamente este grupo de ligas não é tratável termicamente, uma vez que os tratamentos não têm grande efeito nas suas propriedades mecânicas tornando-a comercialmente inviável. Contudo as suas propriedades mecânicas são favoráveis para outro tipo de aplicações. Na figura 45 está representado o diagrama de equilíbrio da liga Al-Mg-Zn.

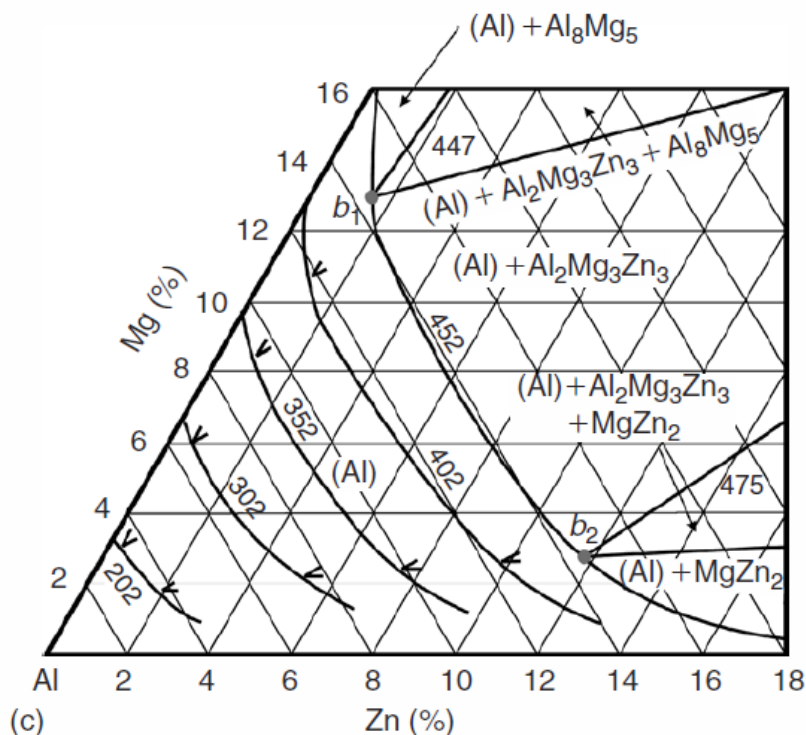


Fig. 45 – Diagrama de equilíbrio do composto ternário Al-Mg-Zn

Estas ligas, são extremamente fáceis de fabricar, apresentam uma boa resistência á corrosão e boas características á deformação plástica. A sua média-alta resistência situa esta liga entre as ligas de Al-Mg-Si e os duralumínios, apresenta também uma resistência á corrosão melhor que os duralumínios mas mais baixa que as ligas Al-Mg-Si. Outras características bastante importantes destas ligas são a sua capacidade de arrefecer rapidamente e o grande intervalo de temperatura entre o ponto de fusão e o ponto em que se verifica a sua completa solubilização.

Apesar deste grupo de ligas ser dos últimos a ser desenvolvido, o seu uso tem-se expandido rapidamente, sendo usadas em pontes militares, mobília de exterior, pilares de suporte dos rails (Fig. 46), caixas e tanques de camiões de transporte (Fig. 47), estando presentes também em algumas aplicações marítimas.



**Fig. 46 – Exemplo de aplicação da liga – Pilar de suporte de rail**



**Fig. 47 – Exemplo de aplicação da liga – Tanque de camião**

A composição das ligas de alta resistência é, Mg 5-9%, Zn 1.5-3.5%, Cu 0.5-2.5%, Mn  $\leq 1.0\%$ , Cr  $\leq 0.5\%$ , Zr  $\leq 0.3\%$ , Fe e Si o mais baixo possível, não podendo o Fe exceder os 0.4% e o Si os 0.2%. A prata também é adicionada a estas ligas em teores até 0.5%.

A composição das ligas de fundição é, Zn 3-7%, Mg 0.5-2%, Cu  $\leq 1.0\%$ , Mn  $\leq 1.0\%$ , Cr  $\leq 0.5\%$ , Zr 0.3%, Fe+Si  $\leq 1.0\%$ . As ligas de baixa resistência tem uma composição próxima das ligas referidas anteriormente, sendo que contém Cu num intervalo de 0.03-0.05%, considerando-o como impureza.

O magnésio e o zinco formam o composto  $MgZn_2$ , ou, em alguns compostos com alto teor de magnésio o composto  $Mg_3Zn_3Al_2$ , sendo estes compostos os responsáveis pela elevada dureza. Se houver cobre presente, este dissolve-se nos compostos formados, actuando como a equivalente quantidade em zinco. Os efeitos pelos quais o cobre é responsável são o baixo ponto de fusão eutético, que sob condições de não equilíbrio pode aparecer em ligas de uso comercial, e o potencial electrolítico, que pela adição de cobre se torna menos negativo permitindo assim uma protecção anódica através da adição de uma liga de Al-Si livre de cobre. A adição mais usada é uma liga de Al-Zn, com 1.5% de Zn, sendo por vezes adicionado manganês. A presença de um eutético contendo cobre melhora a soldabilidade reduzindo a fissuração a quente na zona da ligação soldada, embora se perca um pouco de resistência na zona em torno da área soldada devido á dissolução do eutético. A pequena quantidade de silício existente na liga, está sob a forma do composto de  $Mg_2Si$ , insolúvel devido á elevada percentagem de magnésio, não afectando as propriedades do material. [Mondolfo, 1967]

## **2.6 Revestimentos Usados em Coquilhas**

### **2.6.1 Introdução**

Embora vários aspectos sobre os processos de moldação tenham sido estudados, tal como, a selecção das ligas, a automatização das máquinas, etc., pouca atenção foi dada aos produtos e métodos de preparação das superfícies das coquilhas.

É bastante comum ser o operador que selecciona e prepara o material de aplicação superficial, a escolha baseia-se exclusivamente na experiencia prática e não técnica ou teórica.

Contrariamente ao processo de fundição em areia, em que a permeabilidade da areia compactada permite ao ar escapar-se livremente durante o vazamento, o processo de moldações permanentes utiliza moldes metálicos que são impermeáveis e por isso necessita de uma investigação cuidada de forma a promover uma ventilação adequada.

Comparativamente à fundição em areia, o uso de moldações metálicas permanentes requer condições de enchimento e de solidificação da liga metálica completamente diferentes. A tinta utilizada desempenha um papel bastante importante no meio deste processo, tendo como principais funções:

- Controlar a fluidez do metal de forma a assegurar que este chega a todas as partes da coquilha a uma temperatura que permita o aparecimento de defeitos.
- Controlar as trocas térmicas fazendo com que a liga solidifique correctamente.
- Uma vez que as peças são removidas ligeiramente abaixo do ponto de solidificação a tinta aplicada promove a desmoldação da peça sem grande resistência.
- Controlar o acabamento superficial e portanto as operações de acabamento, implicando uma redução nos custos com operações pós extracção.
- Prolongar a vida útil da moldação, aumentando portanto a produtividade e reduzindo os custos com operações de manutenção da moldação.

## 2.6.2 Transferência de Calor

O controlo da transferência de calor nas várias secções da moldação é, sem sombra de dúvida, uma das características mais importantes das tintas utilizadas, uma vez que permite controlar a direcção de solidificação e enchimento completo da moldação (que será abordado no próximo capítulo).

O grau de isolamento depende:

- Das propriedades do material utilizado.
- Do método de aplicação da tinta na superfície da coquilha
- Da espessura da camada aplicada

Os compostos utilizados na produção das tintas são:

- Cargas – Compostos geralmente por pós refractários como  $\text{TiO}_2$  (Dióxido de Titânio ou Titânia), talco, pó de sílica, óxido de ferro, óxido de alumínio, etc. À temperatura de vazamento, normalmente utilizada nos processos de coquilha (650 – 800 °C), a rectoriedade das cargas tem que ser tal, que impeça que haja qualquer tipo de reacção química. A sua função permanece, para já, meramente física, ou seja, só factores térmicos, de forma ou dimensionais de partículas estão envolvidos. Mais á frente serão abordados outros factores que estão relacionados com o controlo da fluidez de metal.
- Agentes ligantes – Na maior parte dos casos é utilizado silicato de sódio, num ratio de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  apropriado, embora outros materiais sejam utilizados, tal como alguns tipos de argila, amido, resinas fenólicas e furânicas etc.
- Água – Com uma dureza controlada

A compacidade da camada aplicada, que depende do método de aplicação, afecta a capacidade de isolamento térmico da mesma: se a camada não é compacta o suficiente, o contacto entre partículas é menor, fazendo com que a permeabilidade seja elevada.

Os métodos de aplicação podem ser através de um pincel, de uma pistola de spray ou através da imersão do molde (este método não será abordado pois só em condições especiais será utilizado, serão referenciados apenas os mais utilizados). As aplicações com um pincel deixam a superfície da coquilha com um acabamento péssimo, cheia de bolsas de ar o que leva a um elevado aumento do grau de isolamento, o que no entanto é o ideal para outras

superfícies, como por exemplo, as superfícies que contenham os alimentados e os gitos, que não requerem operações de acabamento. A aplicação através da pistola também deixa uma superfície com bolsas de ar, mas de dimensões muito inferiores às da aplicação anterior, e são originadas pela acumulação de partículas e não pela formação de bolsas de ar no agente ligante. São aplicadas várias camadas de tinta até se obter a espessura desejada. A pressão e a distância á superfície de aplicação têm de ser suficientes para vencer o fenómeno de evaporação, e permitir assim que a tinta adira completamente à superfície. Uma pressão de 2 – 5 bar e uma distância de 25 – 30 cm são os valores recomendados.

Peças sem, ou com um nível controlado de, defeitos devido à contracção durante a solidificação podem ser obtidas se se verificar uma direcção de solidificação ideal (Fig. 48), isto é, a solidificação deve prosseguir regularmente das zonas mais afastadas dos alimentadores em direcção aos mesmos.



Fig. 48 – Solidificação direccional

Um revestimento adequado, com a espessura variando com as da peça, se for necessário, permite o controlo da transferência de calor, favorecendo a solidificação direccional.

Por exemplo, aplicando-se numa secção fina da peça uma camada espessa, atrasa-se a solidificação nessa zona, e se se aplicar numa secção mais grossa da peça uma camada mais fina de revestimento, acelera-se a solidificação, por isso, as características de refrigeração do metal podem ser tornadas suficientemente uniformes para dar origem a peças sãs. Quanto maior for a diferença entre as secções de um peça, maiores devem ser as propriedades isolantes do revestimento aplicado. Em casos extremos, por exemplo, o efeito desejado pode ser obtido através da remoção do excesso de revestimento em secções de espessura elevada e através da adição de mais camadas em zonas mais finas. Os alimentadores e gitos, por exemplo, onde o metal deve permanecer mais tempo no estado líquido, requerem normalmente uma camada mais espessa de tinta para melhorar a capacidade de isolamento.

### 2.6.3 Controlo da Fluidade do Metal

Uma vez que a espessura do revestimento é fina (100 - 300 microns) e a temperatura entre a liga metálica e a coquilha varia entre 400 a 500 °C, a condutividade térmica mantém-se relativamente alta e a transferência de calor do metal para a coquilha dá-se instantaneamente e de forma intensa. As características físicas do revestimento (refinamento, tamanho das cargas) têm um efeito marcante não só na qualidade da superfície da peça fundida, mas também sobre o fluxo de metal e grau de isolamento. Por exemplo, uma camada fina com amplos contactos com o metal aumenta a transmissão de calor e reduz rapidamente a fluidez, isso pode resultar no preenchimento incompleto, juntas frias, etc., especialmente quando a pressão metaloestática é baixa, como por exemplo, no caso de peças fundidas com secções finas.

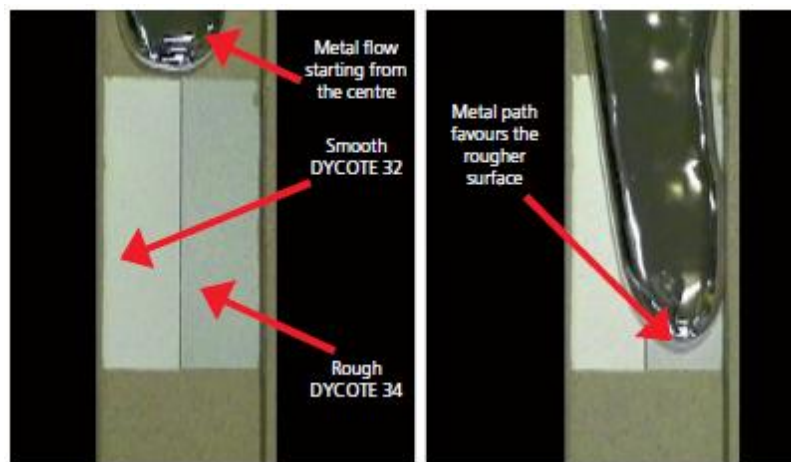


Fig. 49 – Comparação entre dois tipos diferentes de revestimentos

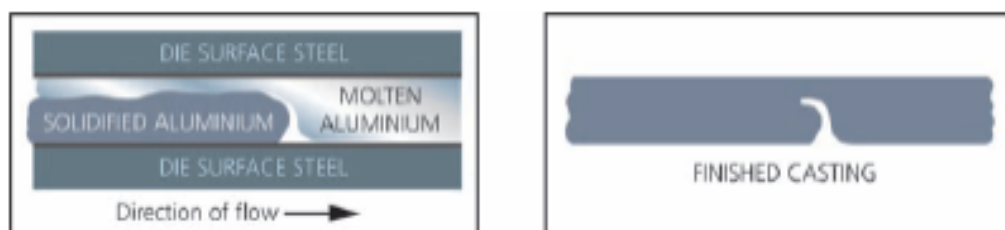


Fig. 50 – Formação de uma junta fria

Por outro lado, uma camada de revestimento com uma superfície grosseira, em que o contacto entre o metal fundido e o revestimento é significativamente reduzido, porque o metal, devido à sua tensão superficial, está em contacto apenas com os "picos" da camada, e só depois de um tempo, embora isso seja extremamente curto, penetra nos "vales" formados, permite que o ar escape através dos canais do revestimento permeável.

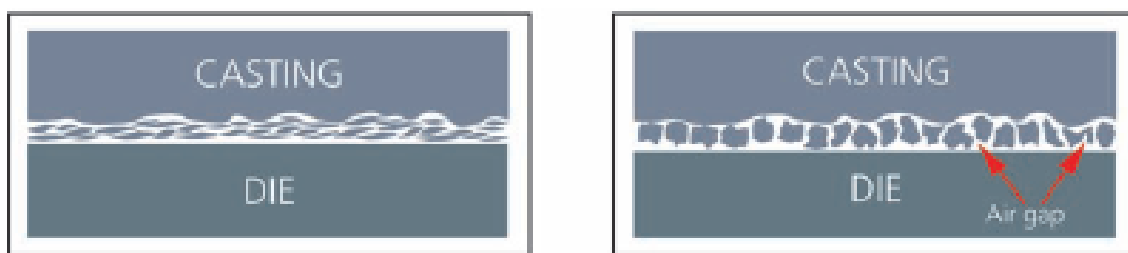


Fig. 51 – Revestimento fino vs. Revestimento grosso

O resultado deste fenómeno é reduzir a perda de calor para um mínimo, no metal fundido, que assim mantém a sua fluidez no momento crítico de preenchimento da coquilha.

A rugosidade das partículas refractárias também influencia o fluxo de metal. Dado que a tensão de superfície do alumínio é alta, as suas características de fluxo e molhabilidade são baixas, como consequência disso, se um revestimento refractário, com partículas afiadas é utilizado, o filme de óxidos de alumínio óxido é permanentemente quebrado durante o vazamento, e o metal vai fluir muito mais facilmente sobre as superfícies. Infelizmente revestimentos grosseiros, com partículas afiadas, tendem a tornar-se mais suaves a cada vazamento, devido ao desgaste promovido pelo metal.

De facto, as partículas afiadas podem romper durante a extracção da peça e pode, portanto, ser necessário retocar regularmente a camada de refractário para obter melhores resultados de forma consistente.

#### 2.6.4 Extracção

Independentemente da complexidade da coquilha, a extracção pode ser facilitada usando grafite numa solução coloidal ou semi-coloidal. A grafite pode ser diluída directamente na composição do refractário ou ser aplicada directamente sobre o refractário. Quando se pretende utilizar grafite na composição do refractário, deve-se ter extremo cuidado de forma a evitar o enfraquecimento do revestimento devido às finas e frágeis lascas de grafite, e o aumento da sua condutividade térmica. A aplicação de grafite sobre o revestimento ocorre em zonas da coquilha onde se prevê que a extracção da peça seja mais complicada, ou em partes móveis. A composição do revestimento tem que ser detalhadamente controlada uma vez que, se os agentes ligantes formarem uma capa dura sobre cada partícula de grafite, as suas propriedades lubrificantes são reduzidas ou eliminadas por completo. Quando um refractário á base de grafite é aplicado, as lamelas são espalhadas de forma desordenada, formando-se uma película de pequenas bolhas, reduzindo a condutividade



térmica da película. Após alguns vazamentos, existe a tendência para a película de grafite se tornar achatada e impermeável (isto pode-se constatar através da aparência brilhante do filme de grafite) como resultado da fricção contínua do metal, devido à contracção durante a solidificação. Portanto, o agente ligante deve ser fraco, permitindo que a película quebre, expondo a subcamada sobre a qual a aplicação de grafite será repetida. A desvantagem, que advém de uma nova aplicação de grafite, é que tende a anular as vantagens da primeira aplicação. O que acontece é que a grafite tende a acumular-se no “vales”, de modo que a camada assume uma textura mais suave, reduzindo a fluidez do metal.

Recentemente, foram desenvolvidos novos refractários, que incluem na sua composição Nitreto de Boro, que tem uma estrutura de grafite com forma hexagonal, que reduz a molhabilidade do alumínio e promove as boas propriedades do refractário permitindo assim que as peças sejam extraídas ainda com maior facilidade. Também a cor branca do produto previne a descoloração das peças, o que normalmente acontece com a grafite.

### **2.6.5 Acabamento Superficial**

Como se pode verificar através do que atrás foi descrito, a qualidade superficial está directamente ligada à escolha do refractário, por exemplo, superfícies planas exigem um revestimento grosseiro angular que promove a fluidez do metal. Isso ocorre porque a pressão metaloestática é baixa e o enchimento da coquilha é facilitado pela contínua quebra do filme de óxidos de alumínio. A superfície da peça será relativamente áspero mas são, enquanto um revestimento muito fino causaria um enchimento incompleto. As partes do molde correspondentes às áreas da peça com menor espessura podem ser revestidas por um refractário mais fino, uma vez que a pressão metaloestática nessas zonas é mais elevada. O método de aplicação também afecta o acabamento superficial, por exemplo, se o revestimento for aplicado através de um pincel, dá origem a uma superfície irregular, ao invés da aplicação por pistola de spray que dá origem a um acabamento superficial de melhor qualidade.

### 2.6.6 Duração do Revestimento

Os factores que contribuem para a duração do revestimento são:

- O tipo de agente ligante
- O método de aplicação
- O tipo de refractário usado

O agente ligante deve ser resistente a altas temperaturas mas também a elevadas variações térmicas, que levam à criação de tensões de tracção no revestimento. Muitas vezes é utilizado silicato de sódio, numa proporção de  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  bem determinada, já que, não só resiste à fadiga térmica como também se torna mais resistente a temperaturas elevadas, aumentando assim a duração do revestimento. Como já foi referido anteriormente, o método de aplicação é um factor importantíssimo para a durabilidade do revestimento, bem como a temperatura do molde, que será provavelmente o factor mais crítico. Se a temperatura for demasiado baixa, e consequentemente, a evaporação da água for retardada, o revestimento forma uma película impermeável que se separa da coquilha levando à formação de bolhas, devido à formação de vapor de água sob a camada. De seguida a camada de revestimento pode contrair e separar-se quando estiver seca, deixando expostas algumas áreas do molde.

Se a temperatura for demasiado elevada e portanto a evaporação da água extremamente violenta, as partículas do refractário, rodeadas por uma película de água e silicato de sódio, separar-se-ão umas das outras, bem como da superfície da coquilha, devido a pequenas explosões que decorrem da libertação do vapor de água para o ar. O resultado é um revestimento fraco, grosseiro, poeirento e que se destaca facilmente das superfícies. Embora, como já foi referido, o ratio dos componentes permanecerem constantes apesar da diluição em água, o ratio de diluição influencia o aspecto final do revestimento. Regra geral, quanto menor a diluição mais fraca a ligação do revestimento ao molde, o que dá origem a um revestimento mais grosseiro, originando também uma baixa condutividade térmica, e portanto, um melhor isolamento.

## **Preparação do Molde**

Um dos requisitos fundamentais na preparação da superfície é a limpeza da mesma, nenhum resíduo do anterior revestimento deve permanecer na superfície, bem como qualquer resíduo de óleo, gordura ou fuligem. A limpeza pode ser realizada com escovas de arame ou por um jacto de areia. Recentemente, sistemas de limpeza de gelo seco foram desenvolvidos, podendo-se aplicar o jacto de areia no local, sem ter que desmontar a coquilha, com vantagens do ponto de vista ecológico, mas com dificuldades em atingir partes mais profundas da coquilha. Outro problema inerente a este sistema, é o barulho ensurdecedor.

### **2.6.7 Temperatura da Moldação**

As coquilhas operam a uma temperatura de cerca de 300 °C, mas o revestimento deve ser colocado numa escala variável de 180 a 250 °C, dependendo do tipo de revestimento a aplicar e do tipo de adesão desejada. Com o aumento da temperatura de aplicação, a aderência é reduzida. Portanto, a temperatura do molde deve ser controlada com precisão durante a aplicação, utilizando um termopar de contacto.

A temperatura à qual a coquilha é aquecida deve ser, preferencialmente, superior (250 a 300 °C), dado que após é deixada a arrefecer, debaixo de uma capa térmica, até se chegar à temperatura de aplicação do revestimento: isto melhora a uniformidade da temperatura no molde e evita que se verifiquem aquecimentos intermédios cada vez que se tenha que aplicar novo revestimento. Após o revestimento da coquilha e antes de se efectuar o primeiro vazamento, a coquilha deve ser aquecida até atingir a temperatura de trabalho. Para se obter os melhores resultados quando se retoca o revestimento, é aconselhável baixar a temperatura até aos valores indicados de aplicação de revestimentos.

### 2.6.8 Espessura do Revestimento

A espessura do revestimento deve ser definido e controlado tendo por base o grau de isolamento que se pretende. Uma espessura da ordem dos 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$  são suficientes para obter o máximo grau de isolamento.

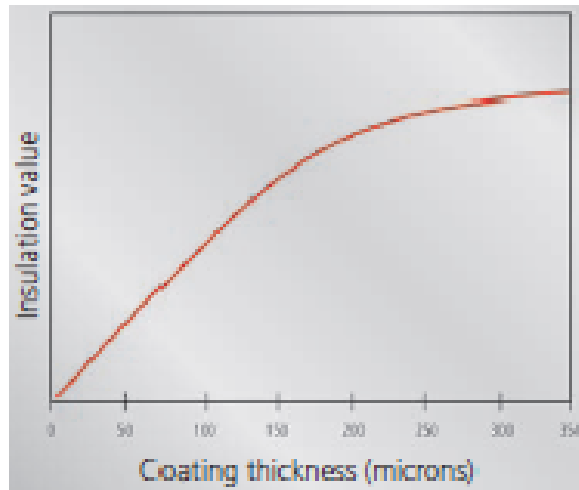


Fig. 52 – Isolamento vs. Espessura do revestimento

A espessura do revestimento é a principal responsável pela troca de calor entre a peça e o molde. Revestimentos aplicados de forma descuidada sobre revestimentos anteriores têm imensas consequências negativas, como por exemplo, alteração da espessura ideal, qualidade da película de revestimento e pontos quentes na peça. Na figura 52 está representado a relação entre o isolamento e a espessura do revestimento, enquanto na figura 53 seguinte mostra a relação entre a temperatura da coquilha e a abrasão.

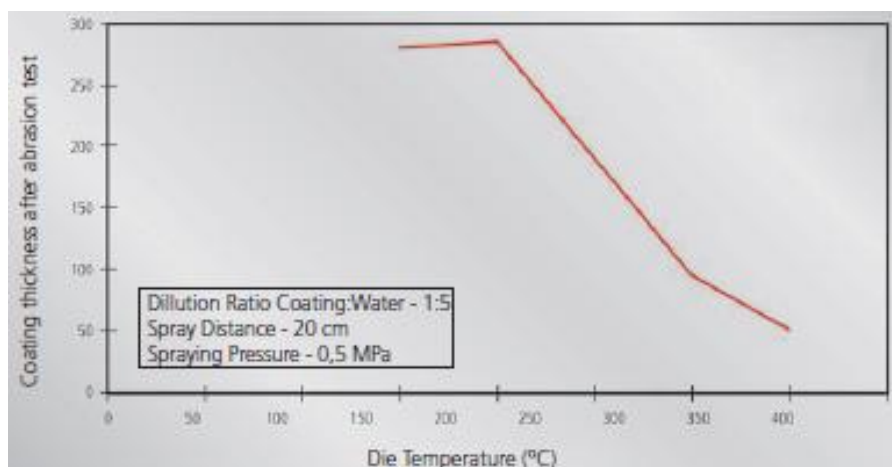


Fig. 53 – Temperatura da coquilha vs. Abrasão

### 2.6.9 Método de Aplicação

O revestimento pode ser aplicado usando os métodos seguintes:

- Pincel
- Spray
- Imersão

O método mais rápido e adequado é aplicação por spray. A aplicação por pincel está reservada para os alimentadores e gitos, onde a espessura deve ser maior ou para pequenos detalhes, onde o revestimento deve ser diferente das restantes zonas.

#### Aplicação por Spray

Existem dois tipos diferentes de dispositivos de aplicação por spray:

- Pistola de ar de alta pressão – Usa ar comprimido para criar um vácuo parcial, forçando o fluido através da pistola, transformando o revestimento em minúsculas gotas.
- Sistemas de bombagem – O fluido é bombeado a alta pressão para o depósito da pistola, onde é forçado a fluir por uma supressão sendo atomizado pela expansão súbita.

Existem determinados procedimentos para obter revestimentos de elevada qualidade, como por exemplo:

- A pistola deve ser cuidadosamente limpa, especialmente o bocal.
- O depósito da pistola deve conter apenas a quantidade de mistura necessária à aplicação
- A pistola deve ser usada sem grandes paragens (nunca superior a 10 minutos)
- A pressão nunca deve ultrapassar os 2-3 bar (dependendo da diluição da mistura). Demasiada ou pouca pressão leva à formação de gotas em vez de uma névoa.
- A aplicação deve ser feita do exterior para o interior da moldação, evitar intermitências na aplicação. Passes curtos mantendo a pistola sempre em movimento.
- Manter uma distância, entre a moldação e a pistola, sempre constante (20 a 30 cm).

- Aplicar rapidamente mas com cuidado, visto que a coquilha vai arrefecendo a cada instante que passa.
- Se a distância de aplicação for muito próxima, a camada tende a ser grosseira, demora muito tempo a secar e pode provocar manchas na peça.
- Se a distância for demasiado grande, parte da água, presente na constituição da tinta, evaporará antes do contacto com a moldação (spray seco), levando a uma fraca adesão e a defeitos superficiais na peça resultante.
- É preferível aplicar o revestimento em várias camadas finas do que de uma vez só.
- Entre camadas é essencial deixar o revestimento secar.
- O operador deve estar sempre em movimento, aplicando o revestimento de diferentes posições e ângulos, podendo assim chegar a todas as superfícies, evitando o efeito “sombra”. Esta prática também evita a acumulação de demasiado revestimento do lado do operador.
- Não permitir que o revestimento escorra na superfície da moldação.
- Limpar sempre o equipamento após utilização.

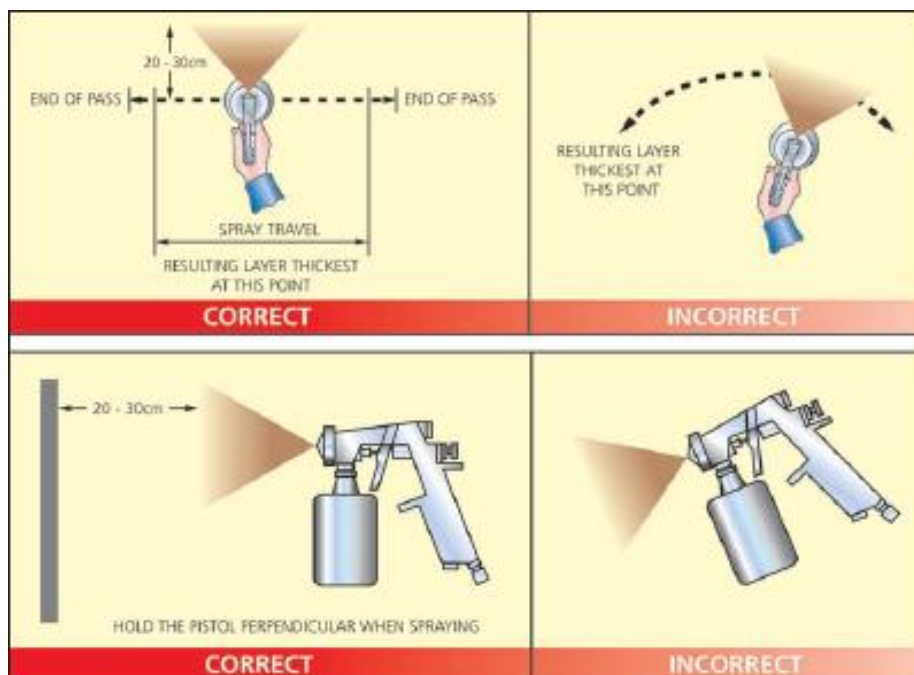


Fig. 54 – Representação do modo correcto de aplicação de revestimento

[Foseco, 2008]

## **2.7 Sistemas para Transferência de Metal**

Este tipo de sistemas faz a comunicação entre os fornos de fusão/manutenção e a moldação, tem como principal objectivo manter o metal a uma temperatura próxima do vazamento e isento de gases. Os sistemas automatizados tem a vantagem de transportar sempre a mesma quantidade de metal e num tempo de ciclo constante, o mesmo já não acontece com os sistemas manuais. A utilização de sistemas automáticos tem-se tornado comum nas fundições de alumínio, traduzindo-se numa maior qualidade das peças obtidas e num menor encargo em termos de mão de obra. Estes sistemas tem que ser revestidos com um refractário por forma a garantir um controlo de temperaturas eficaz, o que faz com que os custos com pré-operações sejam minimizados. Apresenta outras vantagens como o menor consumo de energia e menor perdas de calor. Existem sistemas pré-aquecidos que fazem com que não seja necessário gastar tanta energia durante a fusão do metal.

Empresas com elevado índice de produtividade utilizam normalmente sistemas de transferencia de metal pré-aquecidos, enquanto que empresas que tem uma produtividade limitada utilizam sistemas normais.

## 2.8 Simulação Numérica do Enchimento e Solidificação

O uso de técnicas numéricas para a resolução de problemas complexos de engenharia e de física é hoje uma realidade, graças ao desenvolvimento de computadores de alto desempenho e de grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, que tem vindo a crescer exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a resolução dos mais diversos problemas tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos.

Hoje em dia, o engenheiro ou projectista incumbido de resolver um determinado problema tem à sua disposição, fundamentalmente, três elementos de análise:

- Métodos analíticos
- Métodos numéricos (experimentação numérica)
- Experimentação em laboratório.

Os métodos analíticos apresentam muitas limitações, pois só podem ser aplicados em problemas cujas hipóteses simplificativas os desviam demasiadamente do fenómeno físico real e em geometrias simples. No entanto têm um papel importante no que respeita à validação dos métodos numéricos.

A experimentação em laboratório recorre à configuração real de problemas mas por vezes torna-se muito dispendiosa, perigosa ou até impossível de implementar, como é o caso das questões relacionadas com transferências de calor no núcleo de reactores nucleares.

A experimentação numérica (utilização de métodos numéricos) praticamente não apresenta restrições, podendo resolver problemas complicados, com contornos definidos em geometrias arbitrárias e apresentando resultados de uma maneira rápida e económica relativamente a outros métodos.

A tendência que se observa é a realização de experiências em laboratório cada vez mais sofisticadas, com o intuito de usar os resultados na corroboração de modelos matemáticos e numéricos, na investigação e compreensão de novos fenómenos, que ainda necessitam de ser matematicamente modelados, e na avaliação final de um determinado projecto. Caso esta tarefa seja bem sucedida, o experimentalista deixará de realizar a tarefa repetitiva que ficará a cargo do computador.



A tarefa de um método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes na equação por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Um método analítico que tivesse a habilidade de resolver tais equações permitiria obter a solução de forma fechada e calcular os valores das variáveis dependentes num nível infinitesimal, isto é, para um número infinito de pontos. Por outro lado, quando decidimos fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, aceitamos ter a solução num número discreto de pontos (vértices da malha), esperando que, quanto maior for este número de pontos, mais próxima da solução exacta será a nossa solução aproximada (ou numérica).

### **2.8.1 Modelos de Discretização**

O ponto de partida de qualquer método numérico é o modelo matemático, por exemplo, um conjunto de equações diferenciais parciais e condições de fronteira que regem o processo. A escolha de um modelo apropriado para a aplicação alvo pode conter simplificações das regras de conservação exactas. Contudo a selecção das simplificações a efectuar e a relaxação de determinadas restrições, requer um conhecimento aprofundado do problema em causa, de forma a evitar cometer erros graves. Um método numérico normalmente é desenvolvido para encontrar uma solução aproximada de um conjunto particular de equações, uma vez que é impraticável criar um método de resolução que seja aplicável em todas as situações.

Depois de seleccionado o modelo matemático, tem de se escolher um método de discretização apropriado, isto é, um método de aproximar as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema que serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo [12, 13]. Existem vários métodos sendo os mais conhecidos: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Volumes Finitos (MVF) e Método dos Elementos Finitos (MEF).

Todos os tipos de métodos produzem o mesmo resultado se a malha utilizada for suficientemente boa, contudo, alguns métodos são mais apropriados para determinadas classes de problemas do que outros.

### 2.8.1.1 Método do Elementos Finitos – MEF

O MEF é similar ao MVF em vários aspectos. O domínio é dividido num conjunto discreto de elementos ou elementos finitos que usualmente são não estruturados; em 2D, são usualmente triângulos ou quadriláteros, enquanto em 3D são os tetraedros ou hexaedros que normalmente se usam. O aspecto que diferencia o MEF é o facto de as equações serem multiplicadas por uma *função peso* antes de serem integradas sobre todo o domínio. Na forma mais simples do MEF, a solução é aproximada por uma função linear com os elementos de uma maneira a garantirem continuidade da solução através das fronteiras dos elementos. Tal função pode ser construída através dos seus valores nos cantos dos elementos. Usualmente a função peso tem o mesmo formato.

Esta aproximação é então substituída no integral pesado da lei da conservação e as equações a serem resolvidas são derivadas requerendo que a derivada do integral relativo ao valor de cada nó seja zero; isto corresponde a seleccionar a melhor solução dentro do conjunto de funções permitidas (aquela que tiver resíduo mínimo). O resultado é um conjunto de equações algébricas não lineares.

Uma vantagem importante do MEF é a capacidade para lidar com geometrias arbitrárias; existe uma literatura extensiva dedicada à construção de malhas de métodos de EF. As malhas são facilmente refinadas em regiões de interesse, pois cada elemento pode ser simplesmente dividido em vários. Os MEF são relativamente fáceis de analisar matematicamente e pode ser mostrado que são os mais adequados para certos tipos de equações. O principal inconveniente, que é partilhado com todos os métodos que usam malhas não estruturadas, é o facto de as matrizes das equações linearizadas não serem tão bem estruturadas como as das malhas estruturadas fazendo com que seja mais difícil encontrar métodos de resolução eficientes.

### 2.8.1.2 Método dos Volumes Finitos – MVF

O MVF utiliza como ponto de partida a forma integral da equação da conservação. O domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controlo (VC) contíguos, e a equação da conservação é aplicada a cada VC. No centroide de cada VC localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies dos VC obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC). Os integrais de volume e de superfície são aproximados usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada VC, na qual aparecem os valores das variáveis no nó em causa e nos nós vizinhos.

O MVF pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controlo e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas. O método é inerentemente conservativo, contando que os integrais de superfície (que representam fluxos convectivos e difusivos) sejam os mesmos em faces partilhadas por VC.

A aproximação com o MVF é talvez a de compreensão mais simples, pois todos os termos que precisam de ser aproximados têm significado físico, razão pela qual é popular entre engenheiros.

A desvantagem do MVF em relação ao MDF é o facto de métodos de ordem superior à segunda serem mais difíceis de desenvolver em 3D, com malhas não estruturadas. Isto é devido ao facto da aproximação por VF requerer três níveis de aproximação: interpolação, diferenciabilidade e integração.

O conceito chave usado durante toda a formulação de Volumes Finitos é o princípio de conservação de uma determinada quantidade física expressa pelas equações governativas sobre qualquer volume finito, também denominado volume de controlo.

O domínio é discretizado num conjunto de volumes de controlo não sobrepostos, que podem ser irregulares no tamanho e na forma.

Os valores de uma variável  $\phi$  são armazenados no centroide dos volumes de controlo, ou seja, nos vértices dos triângulos da malha. As equações discretizadas da variável dependente  $\phi$  são obtidas integrando a equação governativa sobre cada um dos volumes de controlo no domínio. O processo de discretização torna-se mais conveniente reconhecendo-se o facto que todas as equações governativas relevantes possuem uma forma comum, isto é, a forma da equação geral do transporte.

As equações que governam o escoamento de fluidos são as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e de energia, escritas no sistema cartesiano de coordenadas, seguintes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^u_i$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T$$

As equações anteriores podem ser escritas de uma forma geral para um campo escalar  $\phi$  como uma equação geral de transporte na forma tensorial

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( T \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right) + S_\phi$$

ou na forma divergente

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \nabla (\rho u \phi) = \nabla (T \nabla \phi) + S_\phi$$

Termo Não Estacionário	Termo Convectivo	Termo Difusivo	Termo Fonte
------------------------------	---------------------	-------------------	----------------

que no caso particular de problemas estacionários, em que  $\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) = 0$ , e onde o termo convectivo é nulo,  $\nabla (\rho u \phi) = 0$ , fica reduzida a

$$\nabla (T \nabla \phi) + S_\phi = 0$$

Assume-se que o domínio do problema está dividido num conjunto de volumes de controlo e que cada volume de controlo  $p$  é limitado pelos planos mediadores de cada um dos segmentos de recta  $[pi]$ , que une  $p$  a cada vértice  $i$  vizinho, conforme ilustrado na figura 55.

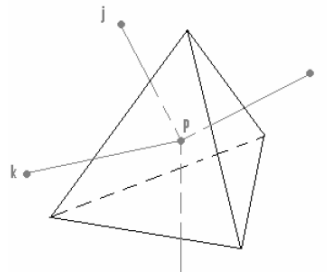


Fig. 55 – Volume de controlo associado ao vértice p da malha

As equações discretizadas da variável dependente  $\phi$  são obtidas integrando a equação governativa sobre cada um dos volumes de controlo do domínio. Portanto a equação, EQUACAO, dá origem a uma nova equação por cada vértice  $p$  da malha, ou seja, tendo como ponto de partida a equação (2.6) integrando no volume de controlo  $\Delta V$ .

$$\Leftrightarrow \int_{\Delta V} \nabla (T \nabla \phi) dV + \int_{\Delta V} S_{\phi} dV = 0$$

pelo Teorema da Divergência

$$\Leftrightarrow \int_A T \nabla \phi \cdot \bar{n} dA + S \Delta V = 0$$

onde o primeiro termo pode ser substituído por um somatório do integral em cada uma das faces do volume de controlo.

$$\Leftrightarrow \sum_i \left( \int_{A_i} T \frac{\partial \phi}{\partial n} dA_i \right) + S \Delta V = 0$$

O primeiro termo da equação pode ser discretizado da seguinte forma:

- Para faces internas –  $\int_{A_i} T \frac{\phi_i - \phi_p}{\|\bar{p}i\|} dA_i$
- Para faces de fronteira onde o fluxo é conhecido –  $\int_{A_i} T \frac{\partial \phi_i}{\partial n} dA_i$

Linearizando  $S$ , obtém-se

$$\sum_i \left( \int_{A_i} T \frac{\partial \phi}{\partial n} dA_i \right) + (S_c + S_{\phi} \phi_p) \Delta V = 0$$

### 3 Projecto Assistido por Simulação para Coquilhas Rotativas com Eixo Longitudinal

A constante inovação e adaptação a novas tecnologias impõe que as empresas estejam sempre em cima do acontecimento. Devido a essa necessidade premente, a empresa STA propôs-se a alterar o modo de fabricação de alguns dos seus componentes, por forma a verificar se é favorável iniciar a produção através do processo de vazamento em coquilhas rotativas. Uma das vantagens deste processo é o enchimento em nascente, ou seja, sem quedas de metal. Outro dos motivos que levou a este estudo foi a intenção de melhorar a qualidade e aumentar as cadências através da automatização do processo. Foi proposto o estudo de dois componentes (manípulo 822 e o manípulo 3), actualmente produzidos por gravidade na liga AG4Z e o projecto de uma nova coquilha para ser implementado na coquilhadora rotativa longitudinal.

Para tal, foram cedidos três CAD's de modo a se iniciar o processo de moldação, para com o apoio em simulação numérica, usando o software comercial *Experto*, proceder ao estudo do processo.

#### Tarefas:

**Manípulo EN179** – Desenvolvimento e projecto de uma coquilha para ser utilizada na coquilhadora longitudinal

- (a) Estudo do enchimento: geometria do gito e parâmetros (ângulo de rotação, geometria da colher, velocidades de rotação)
- (b) Projecto da sortilha e colher
- (c) Projecto da coquilha

**Manípulo 822** – Proposta a adaptação de uma coquilha (fixa) para ser utilizada na coquilhadora longitudinal

- (a) Estudo de comparação entre o vazamento por gravidade e vazamento por coquilha rotativa analisando o enchimento, velocidades e solidificação.

**Manípulo 3253** – Adaptação de uma coquilha (fixa) para ser utilizada na coquilhadora longitudinal

- a) Estudo do enchimento, velocidade do fluxo de metal e solidificação comparando os processos de vazamento por gravidade e coquilha rotativa
- b) Inspeção visual e análise metalográfica

A liga usada foi a AG4Z, como já foi referido anteriormente, trata-se de uma liga de alumínio do grupo de ligas Al-Mg-Zn com a seguinte composição química:

**Tabela 18 – Composição química da liga AG4Z**

Elemento	Fe	Si	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Al
Teor	≤ 0.55	≤ 0.5	0.9 – 1.45	3.2 – 4.5	≤ 0.3	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.2	Restante

O programa utilizado apresenta uma limitação ao nível da rotação e da variação de velocidade de rotação, pois só permite a rotação até 90° e não permite a alteração de velocidade durante o processo, portanto todas as simulações estão limitadas a esses parâmetros. Sabe-se que uma das maiores vantagens do processo de vazamento em coquilha rotativa é a possibilidade de controlar a velocidade de rotação durante o vazamento para permitir um enchimento a velocidades adequadas.

### 3.1 Modelação e Simulação das Coquilhas

#### 3.1.1 Puxador EN179

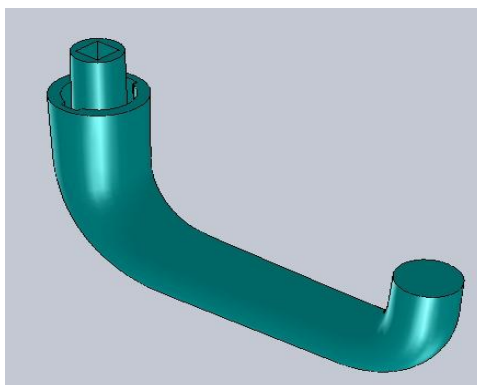


Fig. 56 – CAD do puxador EN179

Geometrias propostas para o sistema de gitagem:

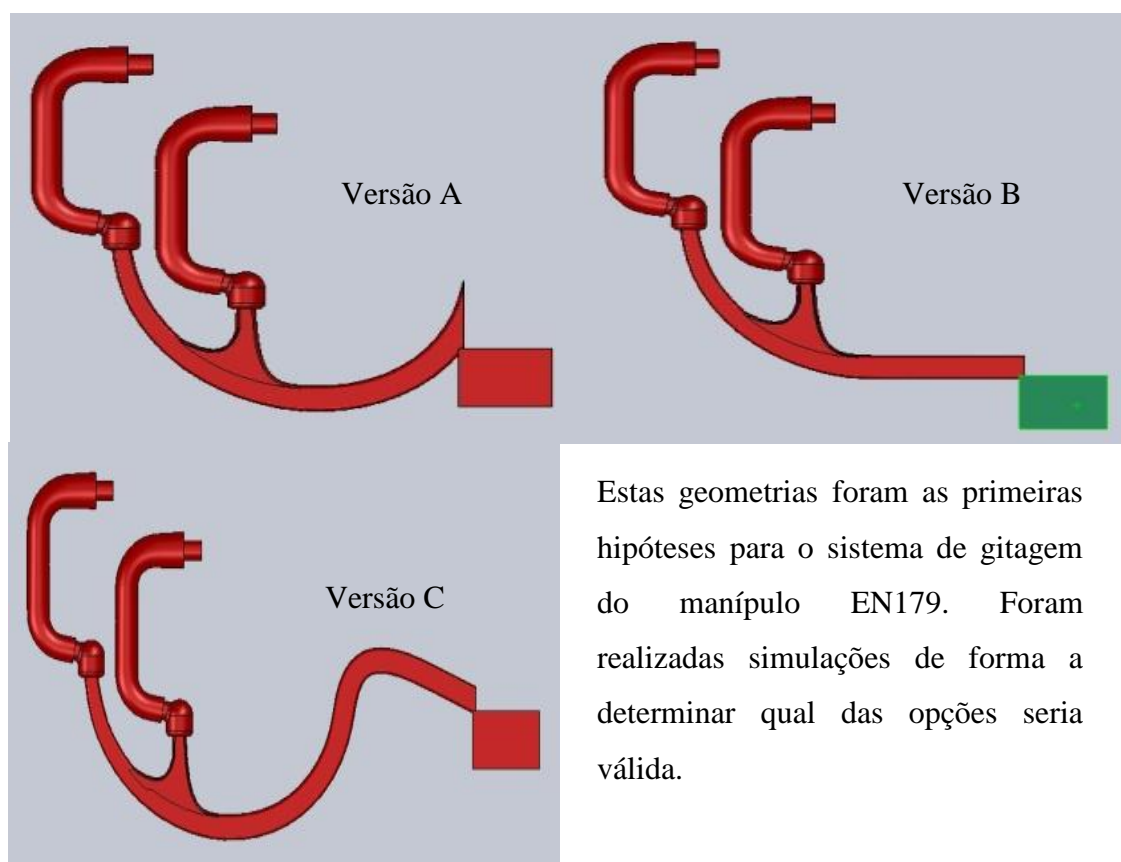


Fig. 57 – Geometrias inicialmente propostas para o sistema de gitagem do puxador EN179



Simulações de enchimento:

Condições:

Velocidades: 30 e 18°/s      Volume: 200 cm<sup>3</sup>  
Rotação: 90 °      Temp.Solidus:582 °C  
Temperatura inicial: 750 °C      Temp.Liquidus:642 °C

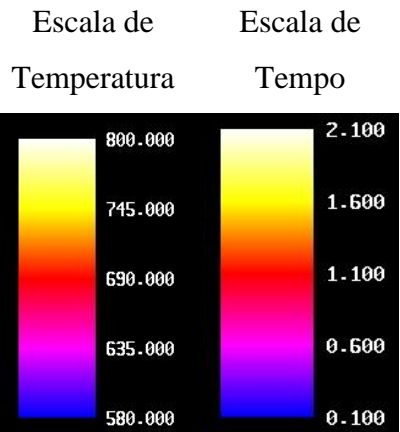


Fig. 58 – Escalas de temperaturas e tempo

Velocidade de rotação: 30°/s

Versão A - % de enchimento

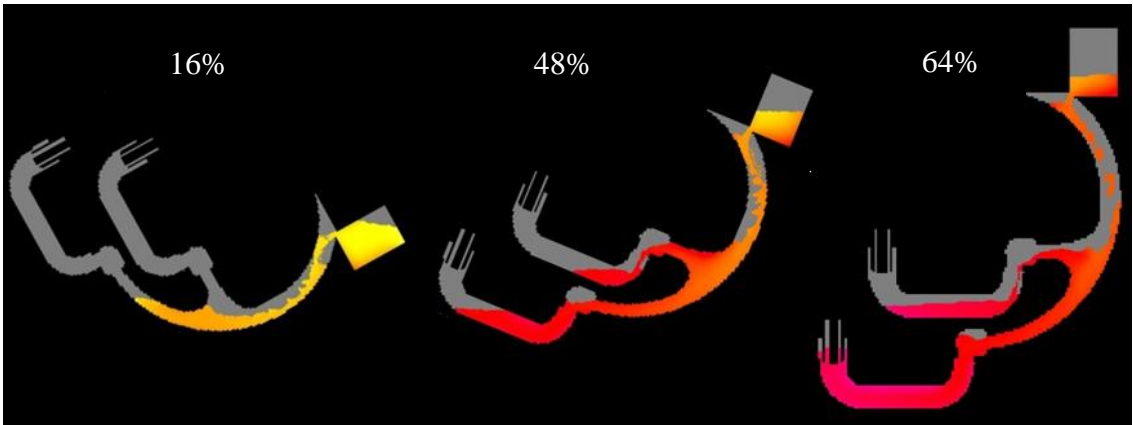


Fig. 59 – Simulação do enchimento da geometria A para 30 °/s

Versão B - % de enchimento

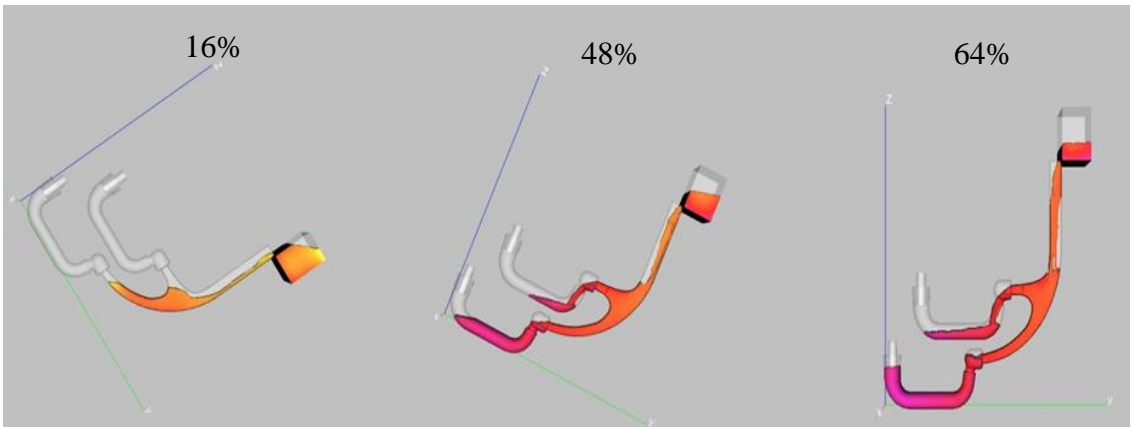


Fig. 60 – Simulação de enchimento da geometria B para 30°/s

Como se pode observar, através das simulações realizadas (fig. 59 e 60) e, uma velocidade de enchimento de 30°/s não é suficiente para garantir o enchimento completo das peças. A versão C não foi testada uma vez que tem um sistema de gitagem mais longo, ou seja, a velocidade de enchimento também não seria suficiente para garantir o pleno preenchimento das peças. Constatou-se então que a velocidade de enchimento teria que ser inferior a 30°/s, o que levou a uma nova simulação das peças com uma velocidade de enchimento de 18°/s, mantendo as outras características de simulação constantes. Note-se que a percentagem de enchimento refere-se às peças e ao sistema de gitagem, ou seja, desde a bacia de vazamento.

Velocidade de rotação: 18°/s

Versão A - % de enchimento - Rotação

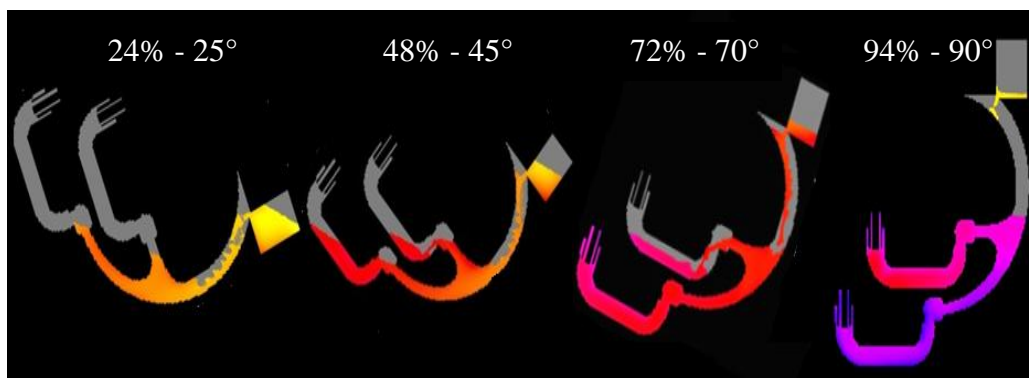


Fig. 61 – Simulação de enchimento da geometria A para 18°/s

Versão B - % de enchimento - Rotação

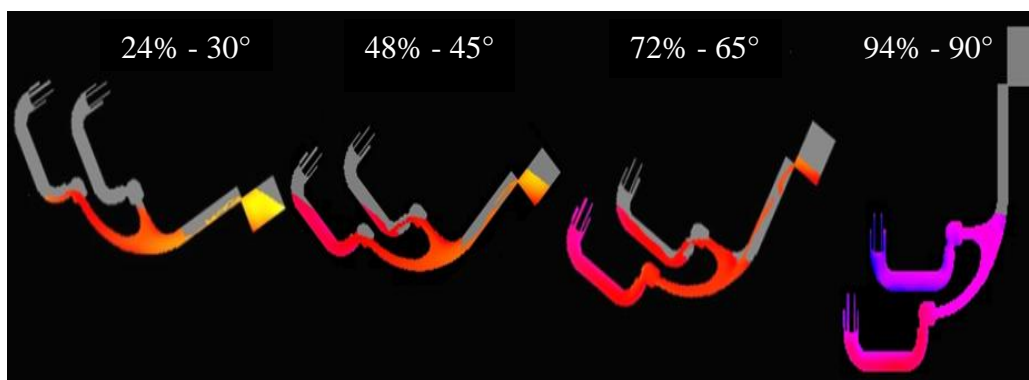


Fig. 62 – Simulação de enchimento da geometria B para 18°/s

## Versão C - % de enchimento - Rotação

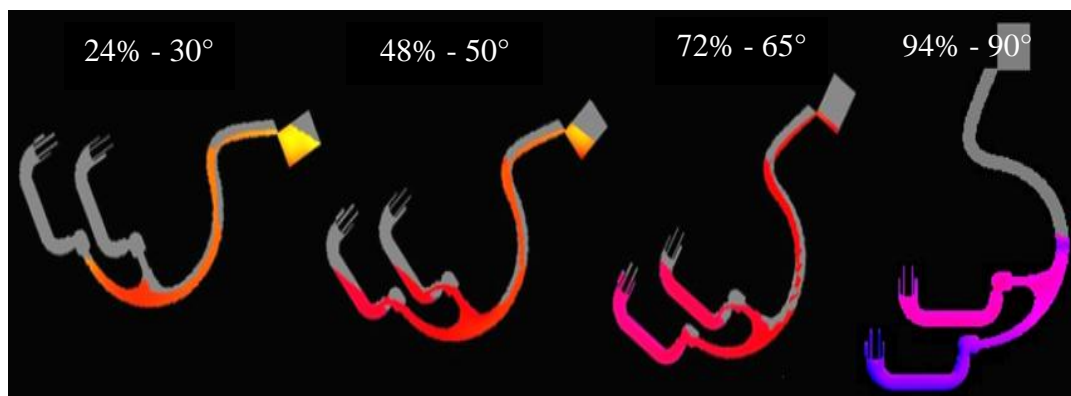
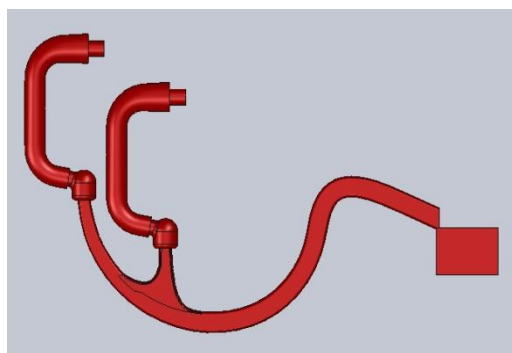


Fig. 63 – Simulação de enchimento da geometria C para 18°/s

Após esta simulação verificou-se que uma velocidade de enchimento de 18°/s era o suficiente para garantir o enchimento das peças, independentemente do sistema de gitagem escolhido. Após a determinação da velocidade de enchimento, outros factores de análise foram introduzidos na escolha do sistema de gitagem ideal. Como se pode observar na simulação da versão B (fig. 62) o metal sofre uma queda bastante acentuada desde a bacia de vazamento até á cavidade, logo, a velocidade do metal é bastante elevada ( $\approx 1\text{m/s}$ ), bem como, se gera um efeito de turbulência não desejado, dando origem a peças com uma qualidade bastante grosseira. Portanto, a versão B foi abandonada após se ter verificado estas condições de funcionamento adversas. Contudo, também se pode verificar que a versão C, no início do sistema de gitagem, possui uma zona recta que leva aos mesmo efeitos negativos da versão B. A versão C deu origem então a uma nova geometria do sistema de gitagem, a versão D, versão essa que sofreu uma alteração no início do sistema de gitagem, como se pode verificar nas figuras seguintes.

## Versão C



## Versão D

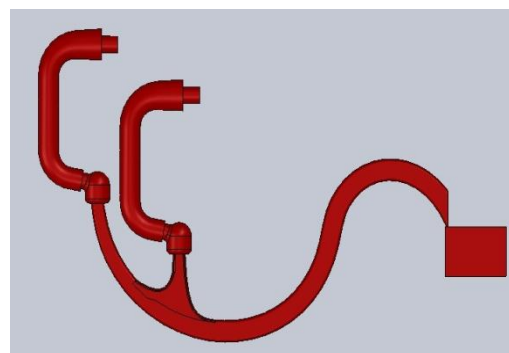


Fig. 64 – Simulação de enchimento da geometria C para 18°/s

A versão A também deu origem a uma nova geometria, essa alteração ficou-se a dever aos problemas que se verificaram aquando da rotação do molde, num determinado ângulo

gerava-se um efeito de turbulência no sistema de gitagem, visível na fiura 61, podendo dar origem a peças de qualidade inferior.

Versão A

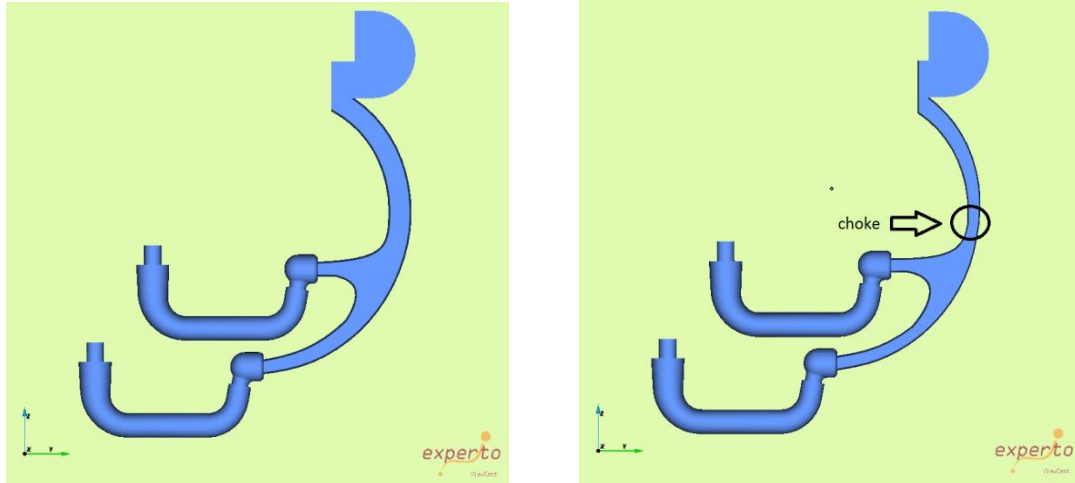


Fig. 65 – Alteração geométrica da versão A que deu origem à versão E

A alteração da geometria consistiu na diminuição da secção do canal de gitagem, mesmo antes das bifurcação do mesmo, com isso pretendeu-se obter um fluxo de metal mais regular, devido á diminuição da velocidade do metal provocada pelo estrangulamento do canal.

Com estas quatro geometrias procedeu-se a um novo estudo, verificando a percentagem de enchimento, para a velocidade de 18°/s.

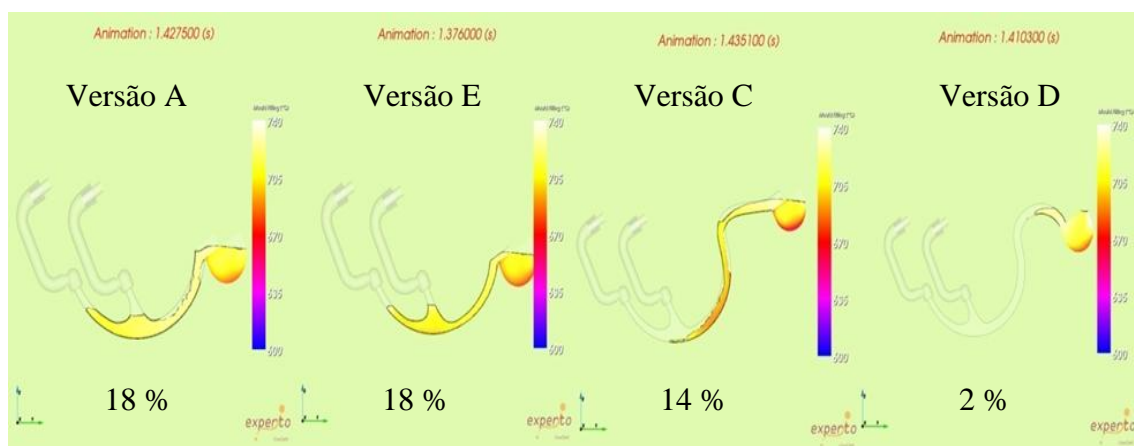


Fig. 65 – Comparação entre as 4 geometrias para 28° de inclinação

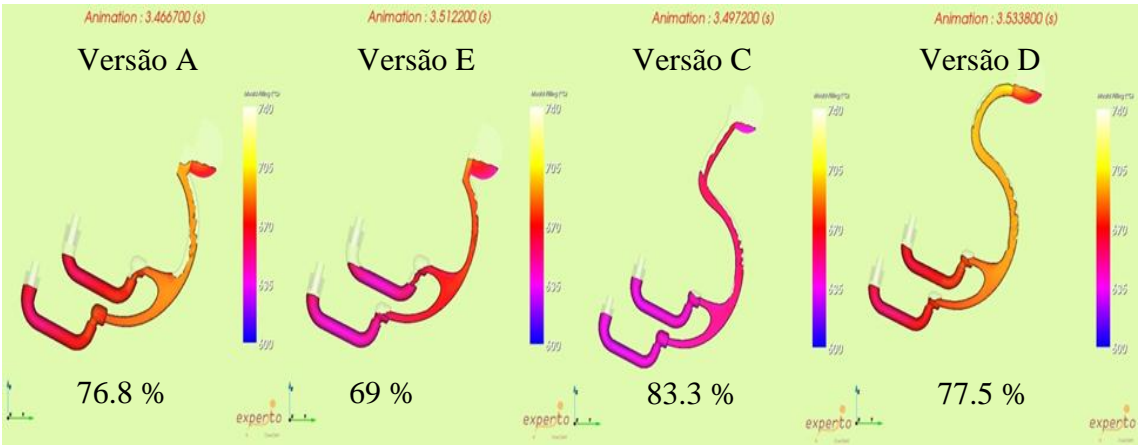


Fig. 66 – Comparação entre as 4 geometrias para 70°

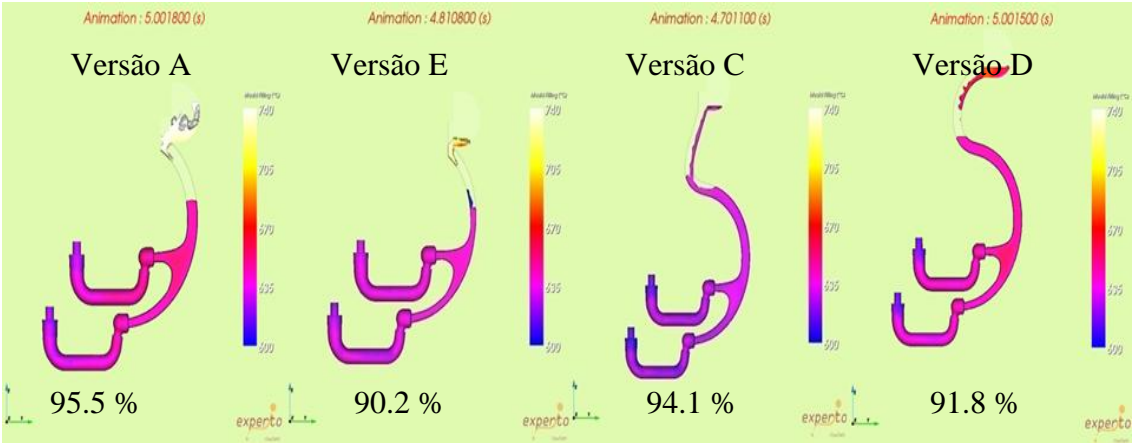
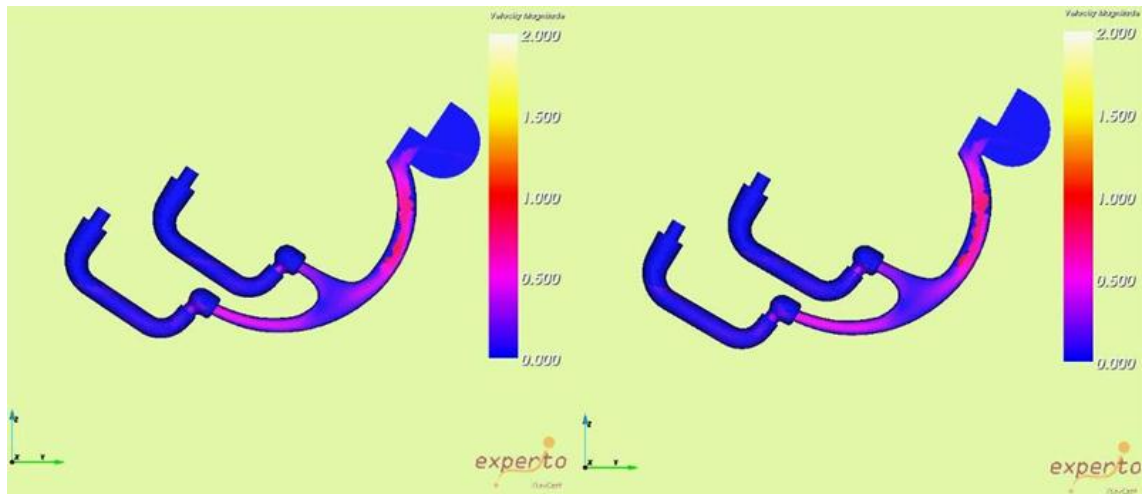


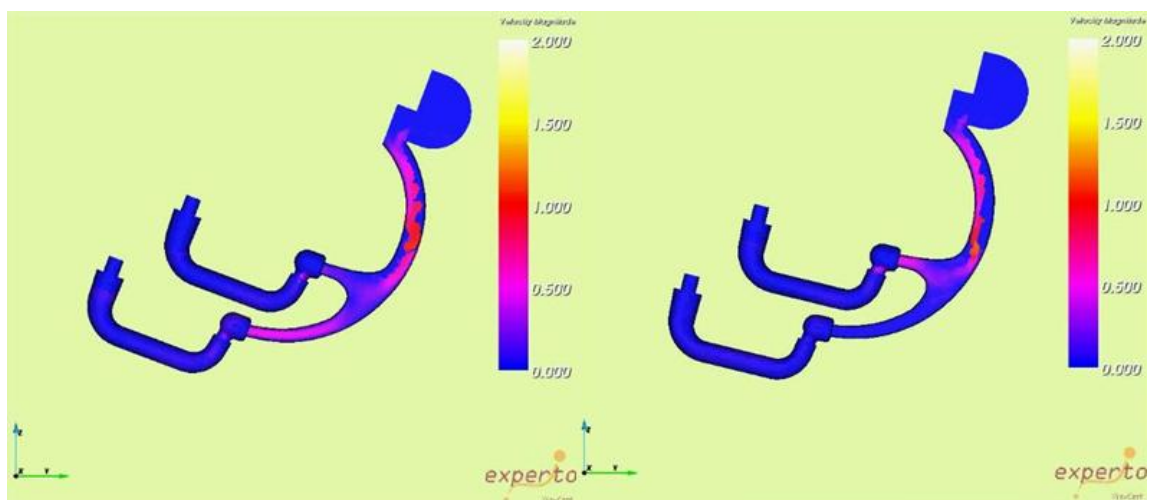
Fig. 67 – Comparação entre as 4 geometrias para 90°

**Perfis de velocidade:**

**Versão A**



**Fig. 69 – Perfil de velocidades da versão A para 30 e 35° respectivamente**



**Fig. 68 – Perfil de velocidades da versão A para 78 e 82° respectivamente**



Versão E

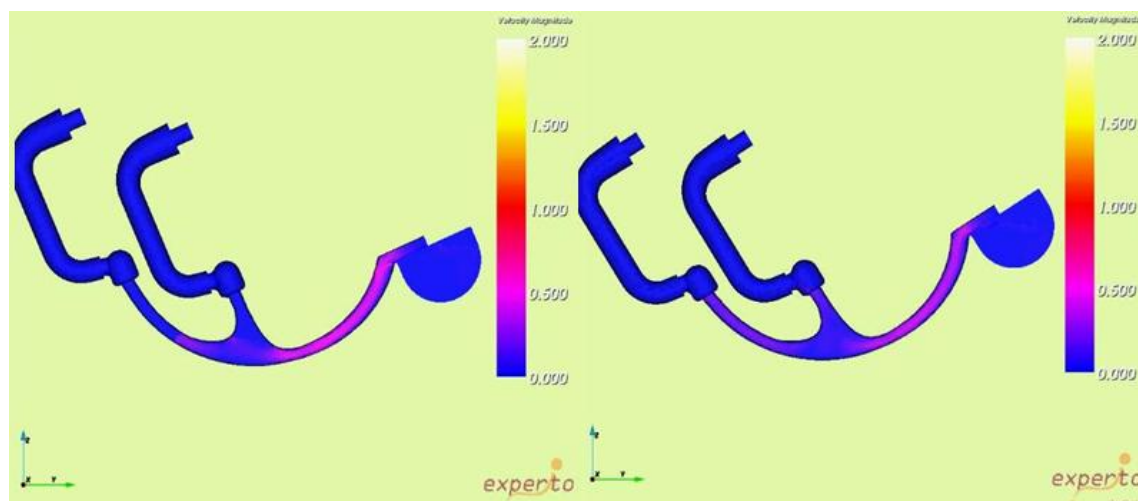


Fig. 69 – Perfil de velocidades da versão E para 28 e 46° respectivamente

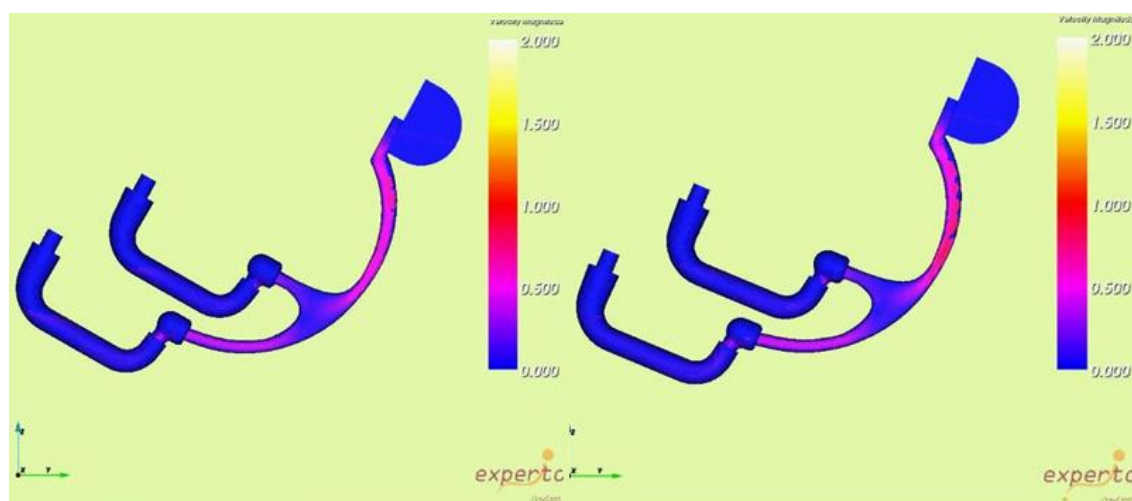
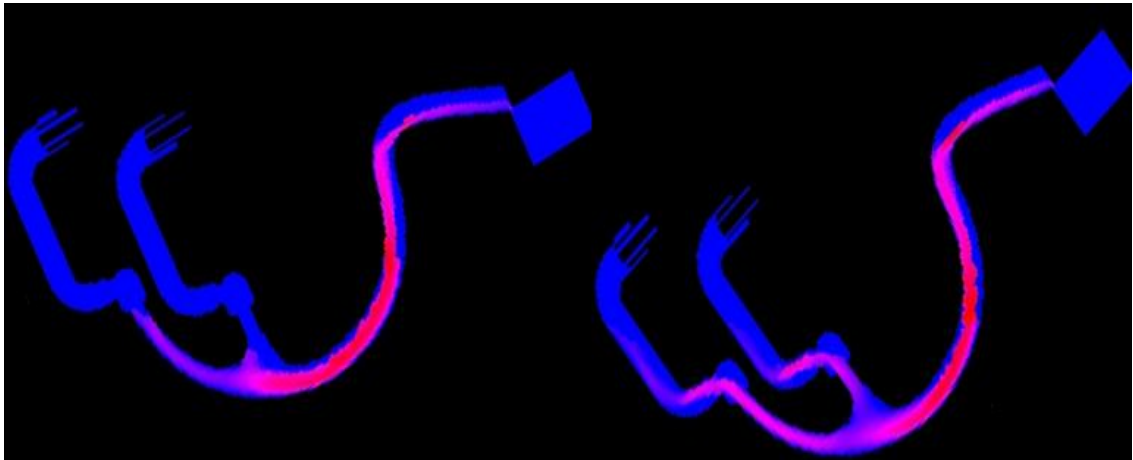
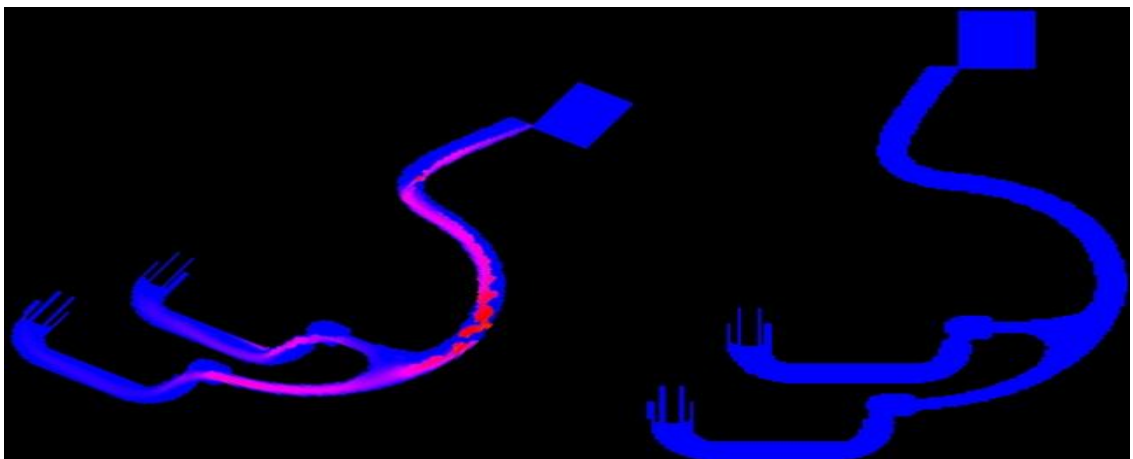


Fig. 70 – Perfil de velocidades da versão E para 68 e 76° respectivamente

**Versão C**

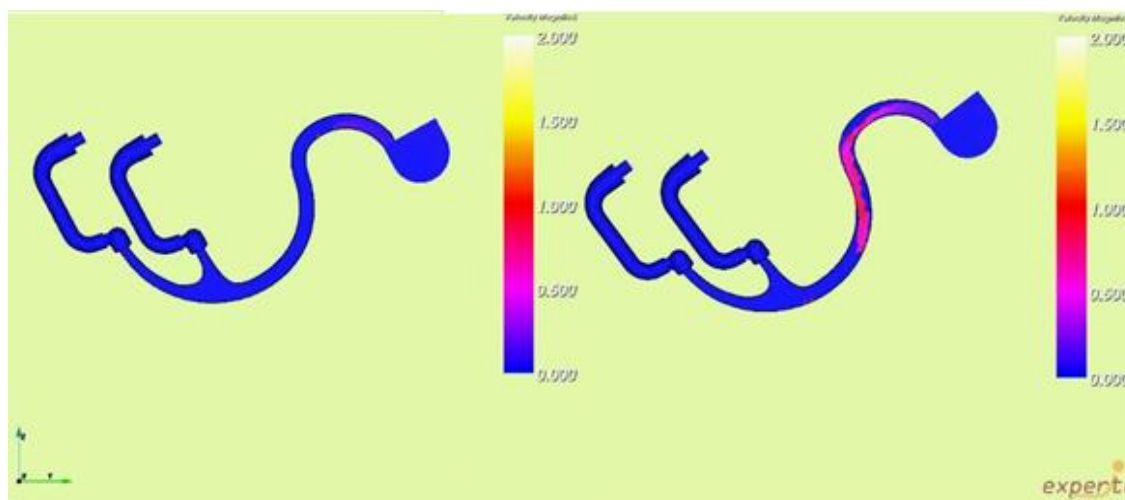


**Fig. 71 – Perfil de velocidades da versão D para 40 e 45° respectivamente**

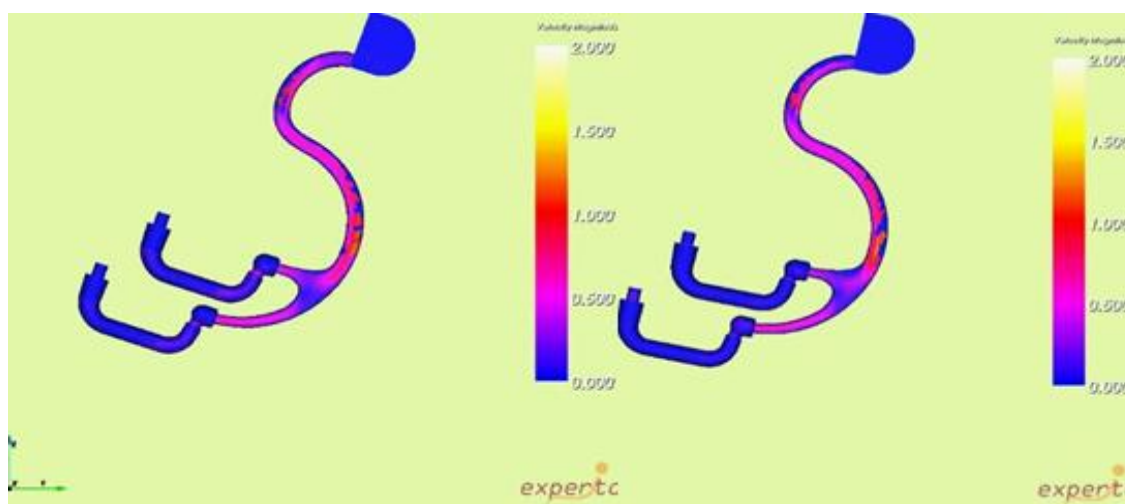


**Fig. 72 – Perfil de velocidades da versão D para 77 e 90° respectivamente**



**Versão D**

**Fig. 73 – Perfil de velocidades da versão D para 40 e 45° respectivamente**



**Fig. 74 – Perfil de velocidades da versão D para 80 e 87° respectivamente**

Todas as geometrias garantem o enchimento completo das peças, mas outras características estão em causa, como a velocidade desenvolvida e os gradientes de temperatura que se verificam com o decorrer do fluxo de metal. A versão A (fig. 69 e 70) apresenta um perfil de velocidades mais violento que a versão E (fig. 71 e 72), bem como uma menor diminuição da temperatura do metal. Na versão E, as peças apresentam também um enchimento mais simultâneo do que na versão A.

Relativamente às outras duas versões pode-se constatar que na segunda curva do sistema de gitagem (fig. 73 e 74), imediatamente antes da bifurcação do mesmo, gera-se um efeito de turbulência indesejado. As velocidades aí atingidas são relativamente elevadas e podem levar à obtenção de peças de qualidade grosseira. A versão C apresenta uma diminuição da temperatura mais favorável que a versão D (fig. 66, 67 e 68), mas as velocidades desenvolvidas são demasiado elevadas para garantir um enchimento sem defeitos.

Comparando estas quatro versões entre si, facilmente se chega à conclusão que a que irá gerar melhores resultados será a versão E.

Após a determinação de uma geometria para o sistema de gitagem procedeu-se novamente a alterações, o que levou à geração de uma nova geometria, baseada na versão E. Esta nova alteração consistiu na expansão da secção do gito. Houve alterações relativamente à liga (temperatura de solidus e liquidus), aos tempos testados, volume de metal e temperatura inicial. A nova versão apresenta uma secção de topo de  $350 \text{ mm}^2$  que diminui até  $175 \text{ mm}^2$ , enquanto que a versão E tem uma secção de topo de  $175 \text{ mm}^2$  que diminui até  $90 \text{ mm}^2$ .

Quanto às linhas solidus e liquidus tem a ver com o facto de se ter procedido a uma nova pesquisa bibliográfica e se ter encontrado dados mais recentes relativamente à liga AG4Z. O novo tempo de enchimento, 4,5s de rotação mais 0,5s fixo, está relacionado com o que sucede na realidade, ou seja, em qualquer vazamento efectuado o tempo total de enchimento não corresponde unicamente à rotação, depois de atingido o ângulo final de rotação o molde permanece na posição final durante um curto espaço de tempo para permitir a extracção da peça após o vazamento.

A diminuição da temperatura de vazamento está implícita na análise das simulações anteriores, uma vez que se verifica que o metal no fim da operação está a uma temperatura um pouco elevada. O volume de metal foi diminuído uma vez que se está a vazar metal em excesso.

Tempos testados: 4,5s de rotação + 0,5s fixo

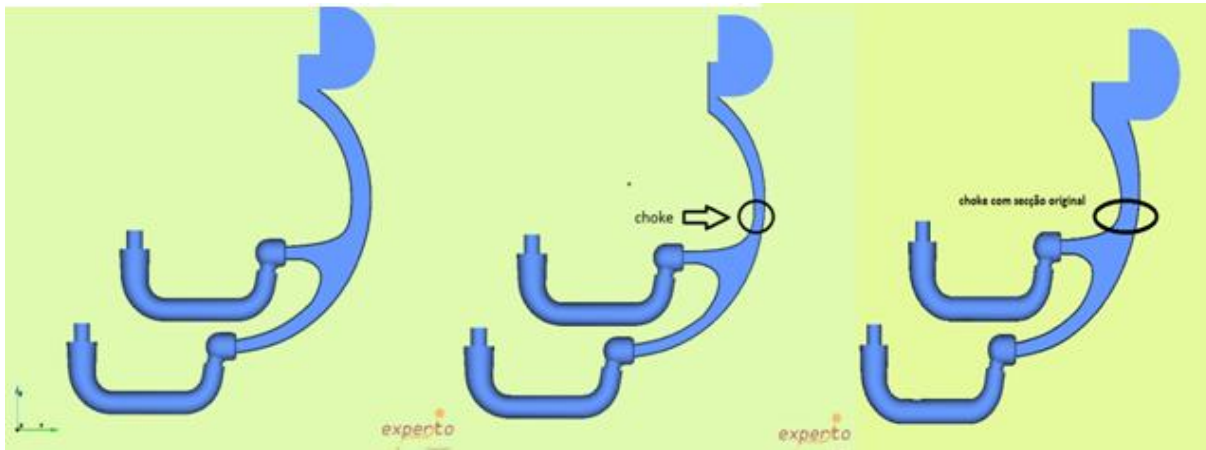
Volume: 185 cm<sup>3</sup>

Temperatura inicial: 700 °C

Solidus: 570 °C

Temperatura do molde: 300 °C

Liquidus: 640 °C



Versão A – Relação  
de áreas – 1:1

Versão E – Relação de  
áreas de 60% – 0.6:1

Versão F – Relação de  
áreas de 100% – 2:1

Fig. 75 – Relação de áreas das versões A, E e F

## Versão E

Tempo: 1s

Tempo: 1.5s

Rotação: 20°

Rotação: 30°

Enchimento: 10%

Enchimento: 20,4%

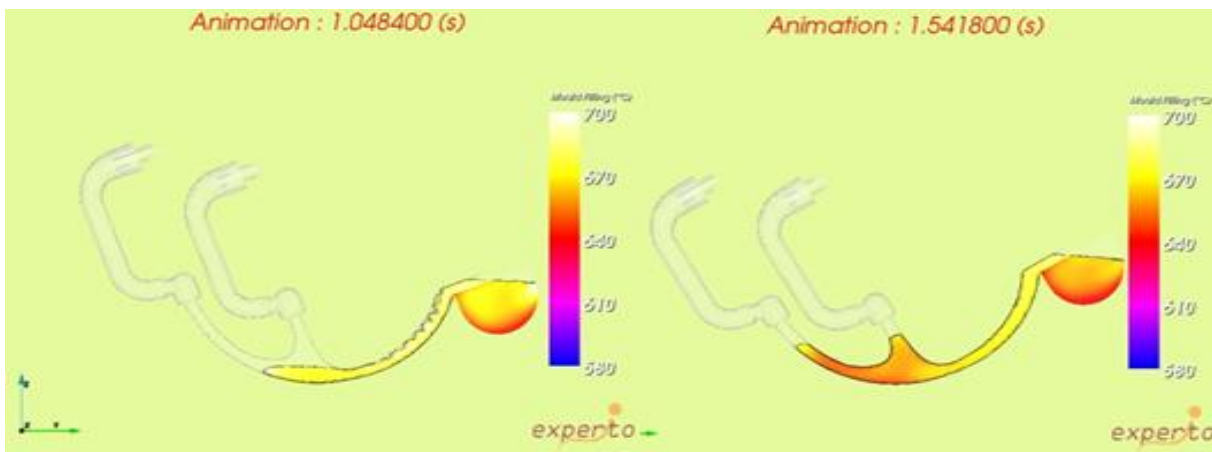


Fig. 76 – Análise do enchimento da versão E (1)

Tempo: 2.5s

Tempo: 3s

Rotação: 50°

Rotação: 60°

Enchimento: 47%

Enchimento: 61.2%

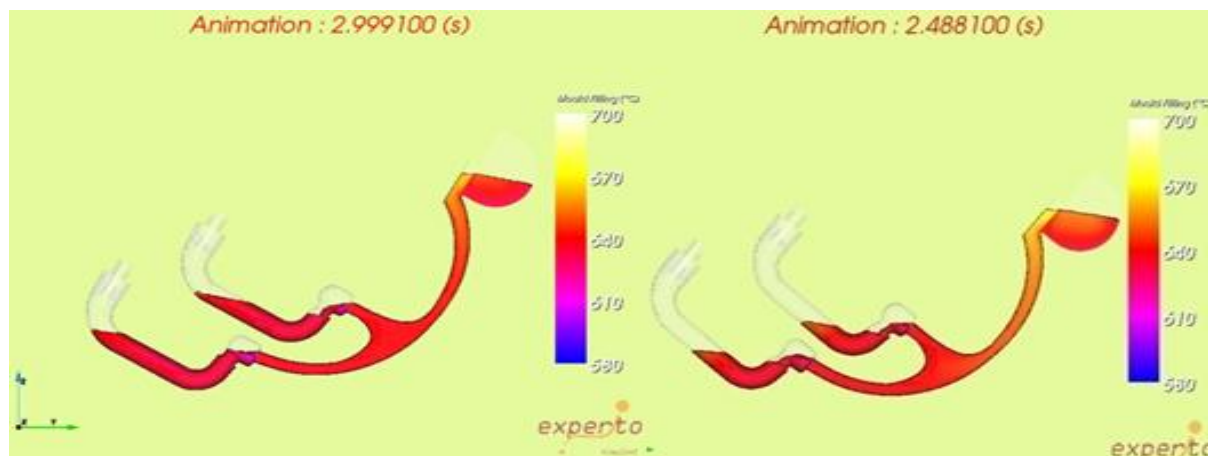


Fig. 77 – Análise do enchimento da versão E (3)

Tempo: 5s

Rotação: 90°

Enchimento: 99.4%

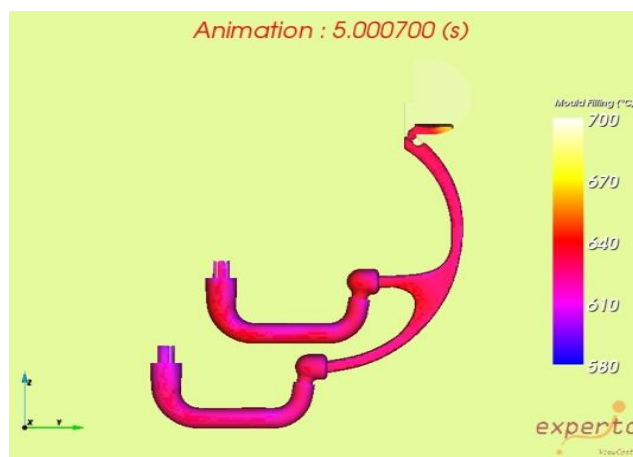


Fig. 78 – Análise do enchimento da versão E (3)

## Versão F

A nova versão sofreu algumas alterações relativamente ao tipo de ataque, testaram-se duas geometrias de ataque novas, uma cilíndrica e uma hexagonal. Os resultados são apresentados de seguida. O objectivo é tentar perceber se a forma dos ataques influencia de alguma forma a entrada de metal na cavidade.

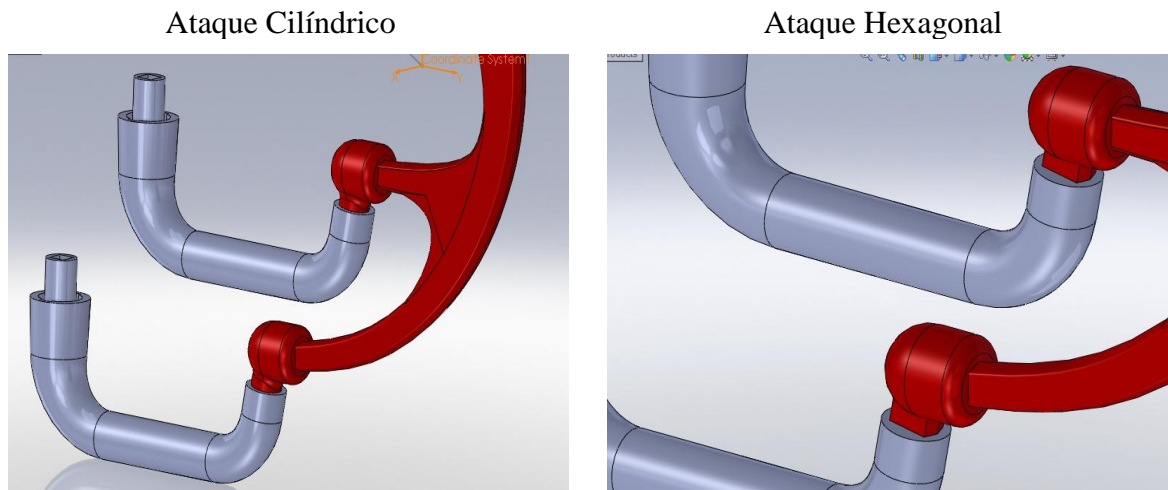


Fig. 79 – CAD dos ataques cilíndricos hexagonais

## Versão F – Ataque Cilíndrico

Tempo: 1s

Rotação: 20°

Enchimento: 12.2%

Tempo: 1.6s

Rotação: 30°

Enchimento: 22.3%

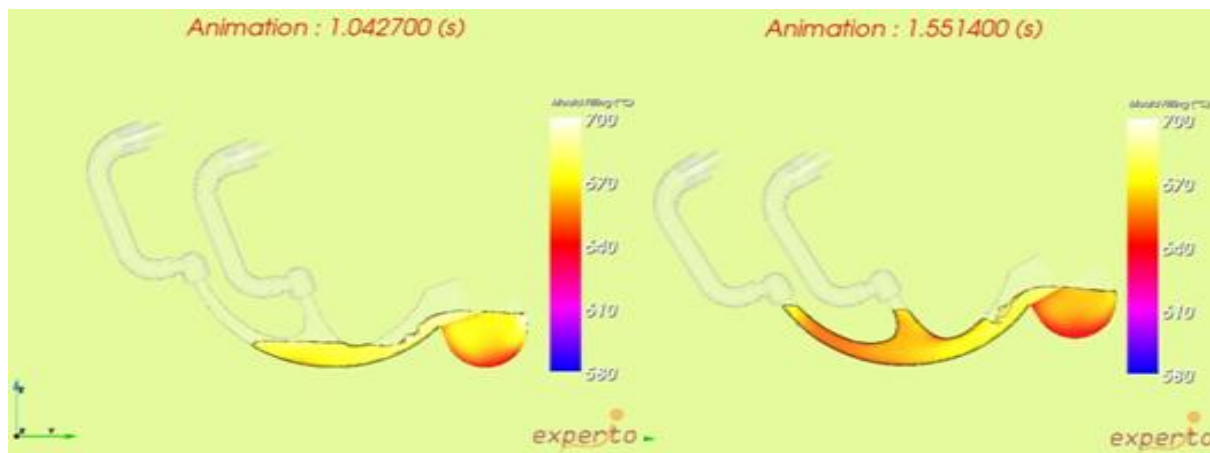


Fig. 80 – Análise do enchimento da versão F com ataques cilíndricos (1)

Tempo: 2.5s

Rotação: 50°

Enchimento: 54.8%

Tempo: 3s

Rotação: 60°

Enchimento: 71%

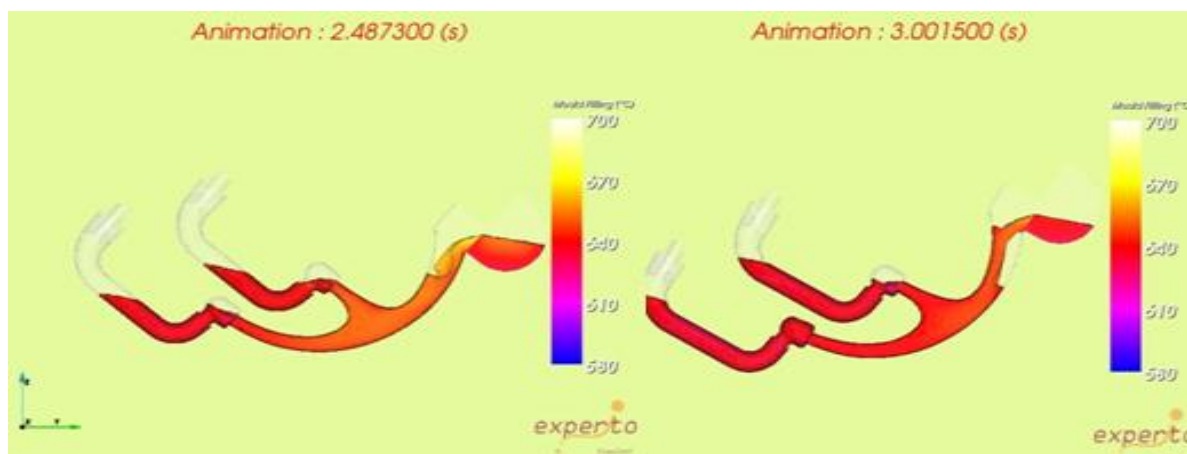


Fig. 81 – Análise do enchimento da versão F com ataques cilíndricos (2)

Tempo: 5s

Rotação: 90°

Enchimento: 97%

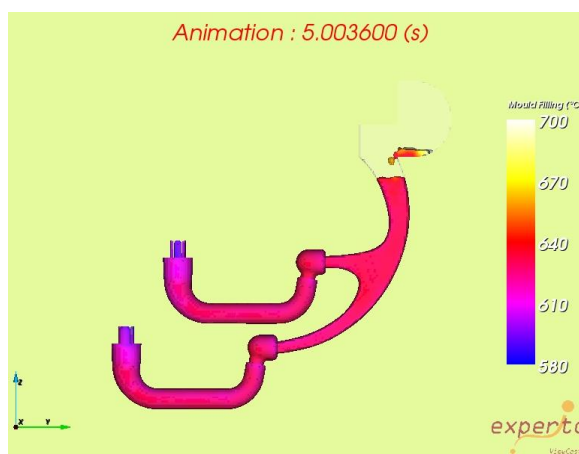


Fig. 82 – Análise do enchimento da versão F com ataques cilíndricos (3)

### Versão F – Ataque Hexagonal

Tempo: 1s

Tempo: 1.5s

Rotação: 20°

Rotação: 30°

Enchimento: 12.2%

Enchimento: 20.3%

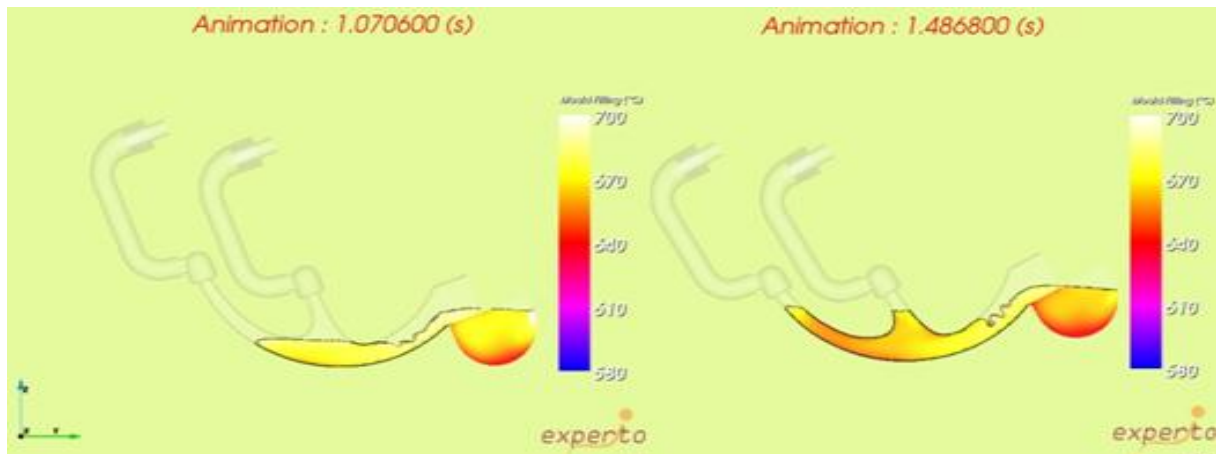


Fig. 83 – Análise do enchimento da versão F com ataques hexagonais (1)

Tempo: 2.5s

Tempo: 3s

Rotação: 50°

Rotação: 60°

Enchimento: 55%

Enchimento: 71.2%

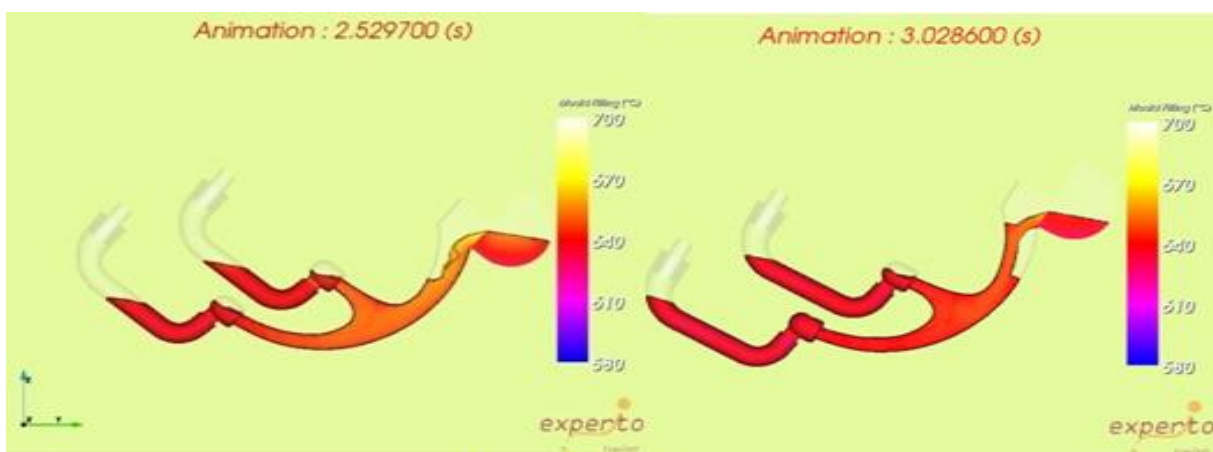


Fig. 84 – Análise do enchimento da versão F com ataques hexagonais (2)



Tempo: 3.9s

Tempo: 5s

Rotação: 80°

Rotação: 80°

Enchimento: 93.4%

Enchimento: 98.4%

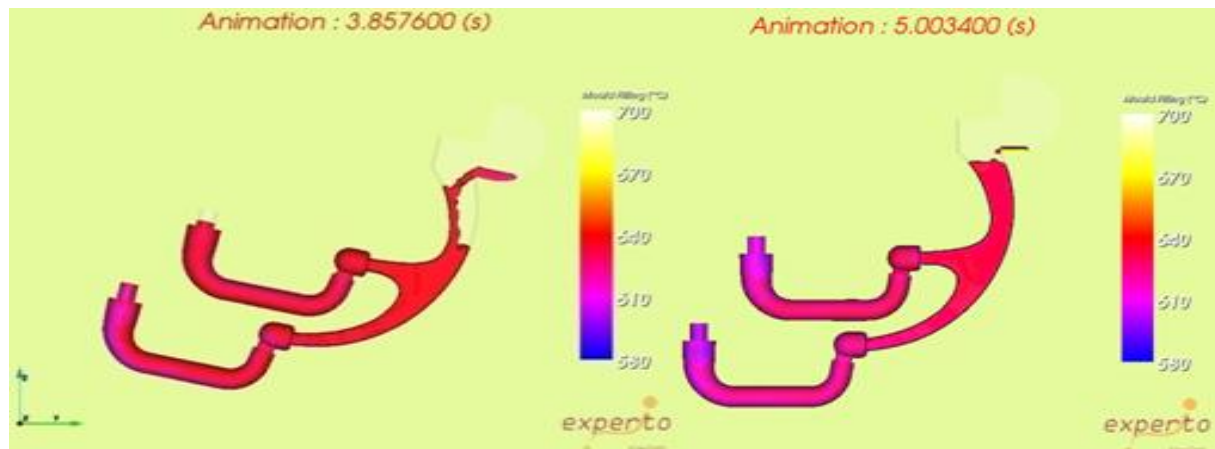


Fig. 857 – Análise do enchimento da versão F com ataques hexagonais (3)

O que se pode concluir após estas simulações é que o enchimento das versões F, ataque cilíndrico (fig. 82, 83 e 84) e ataque hexagonal (fig. 85,86 e 87), não diferem muito do enchimento da versão E e ambas as peças enchem praticamente ao mesmo tempo. A vantagem do novo sistema de gitagem reside no facto deste eliminar praticamente toda a turbulência que se verifica com o fluxo de metal. Existe turbulência apenas na entrada do sistema de gitagem, mas com o decorrer da simulação verifica-se que o escoamento se torna praticamente laminar.

## Perfis de velocidade

### Versão E

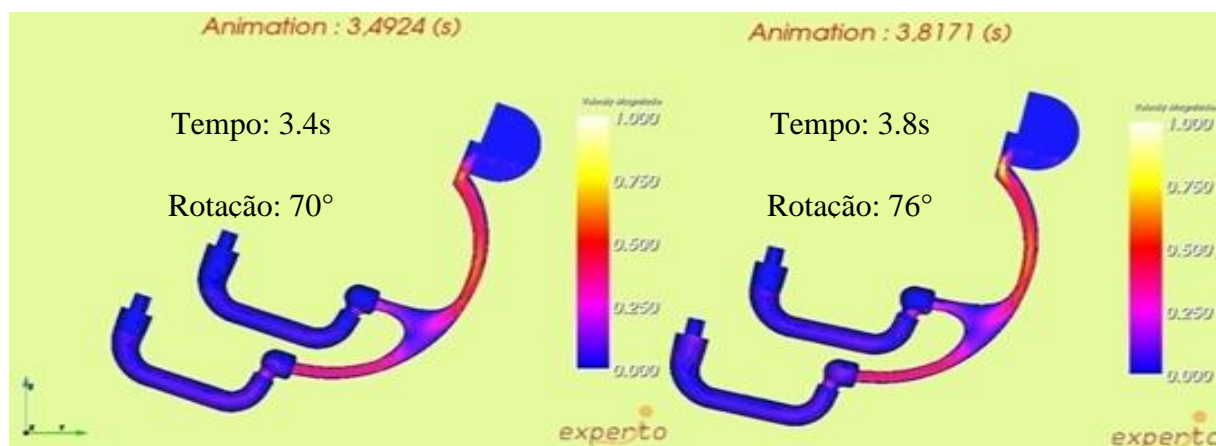


Fig. 86 – Análise do perfil de velocidades versão E



### Versão F – Ataque cilíndrico

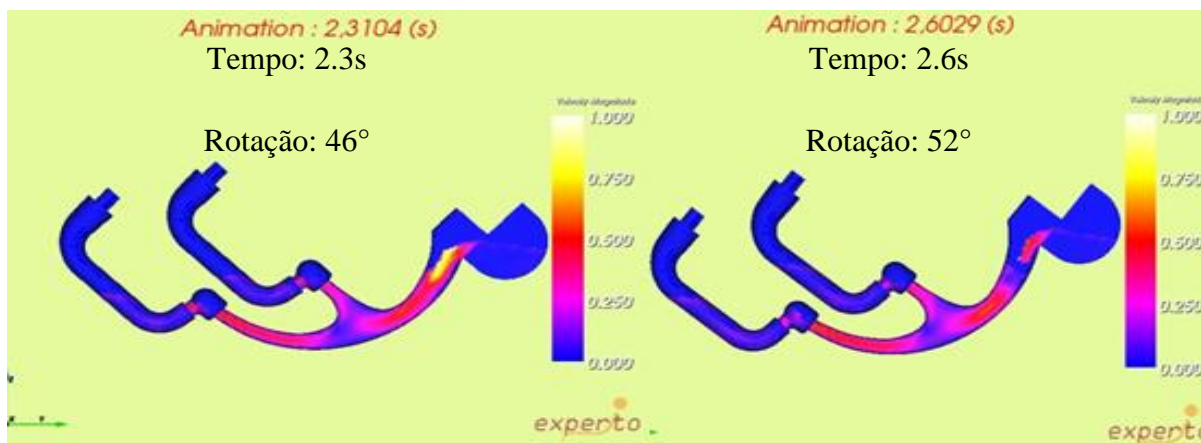


Fig. 87 – Análise do perfil de velocidades versão F com ataques cilíndricos

### Versão F – Ataque Hexagonal

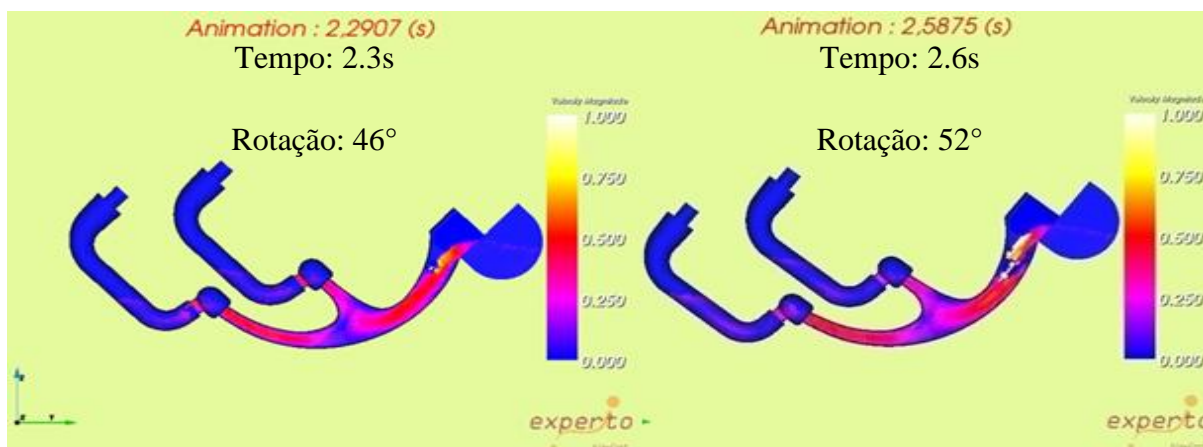
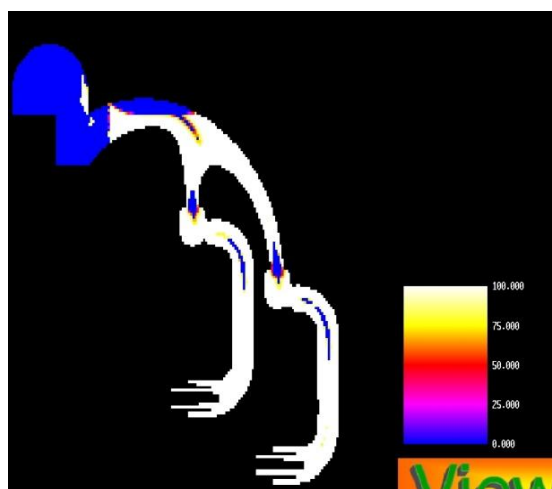


Fig. 88 – Análise do perfil de velocidades versão F com ataques hexagonais

Apesar do novo sistema de gitagem apresentar um perfil de velocidades mais violento que a versão E, só existe turbulência nas zonas de entrada. Ambas as peças enchem praticamente em simultâneo. Por volta dos 76° de rotação da peça existe um aumento súbito de velocidade na zona de encaixe dos machos, para a versão F com ataque hexagonal. A vantagem deste novo sistema de gitagem consiste na eliminação da turbulência a partir da zona de entrada. Em termos do tipo de ataque, o melhor resultado é obtido com o ataque hexagonal porque permite uma distribuição de temperatura mais uniforme na zona das peças, independentemente do aumento súbito de velocidade na zona de encaixe dos machos. Esse aumento não acarreta consequências negativas para a qualidade da peça. Na versão E existe também o perigo do choke criar um bottleneck demasiado curto, ou seja, criar uma acumulação de material indesejada fazendo com que este reflui-se de novo para a bacia de vazamento durante a rotação da coquilha.

## Solidificação

Versão E



Versão F – Ataque Cilíndrico



Versão F – Ataque Hexagonal

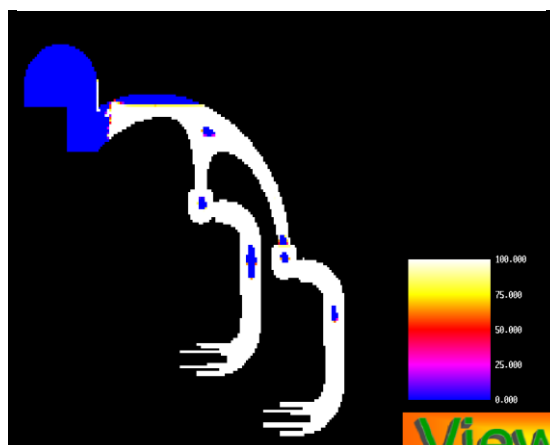
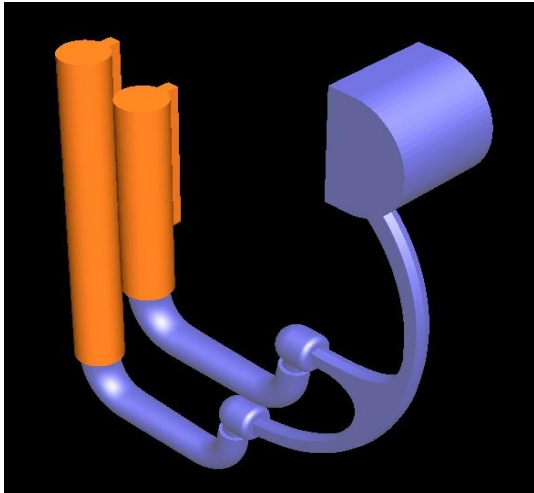


Fig. 89 – Análise solidificação das diferentes versões

Os defeitos aparentam ser maiores na versão E, relativamente à versão F, o sistema com ataques hexagonais apresenta menos defeitos no plano medial da peça. Após as simulações de solidificação efectuaram-se novas simulações de solidificação com os machos incorporados nas peças, funcionando como mecanismos de refrigeração. Testaram-se as versões E e F com ataques hexagonais.

Versão E



Versão F – Ataque hexagonal

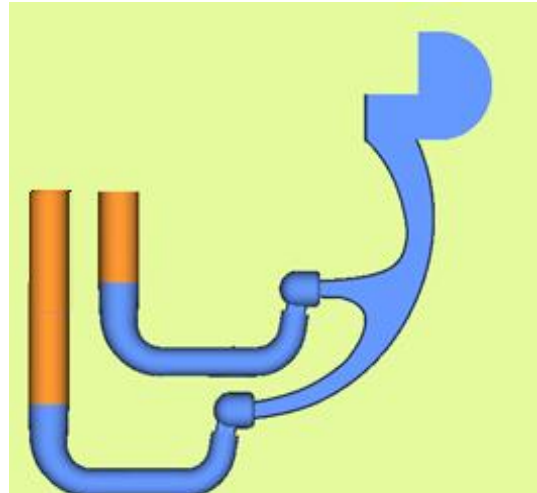


Fig. 90 – Colocação dos machos na versão E e F

Após a determinação das geometrias que garantiam melhores resultados, foram efectuadas as simulações com os machos. O objectivo foi verificar que tipo de influência é que estes componentes tinham durante a solidificação da peça, uma vez que estão a temperaturas muito mais baixas. Na versão E testou-se apenas um conjunto de machos, que estavam a 40°C, enquanto que na versão F foram testados dois conjuntos, um a 40°C e outro a 80°C.

Versão E – Sem Arrefecedores

Versão E – Com Arrefecedores

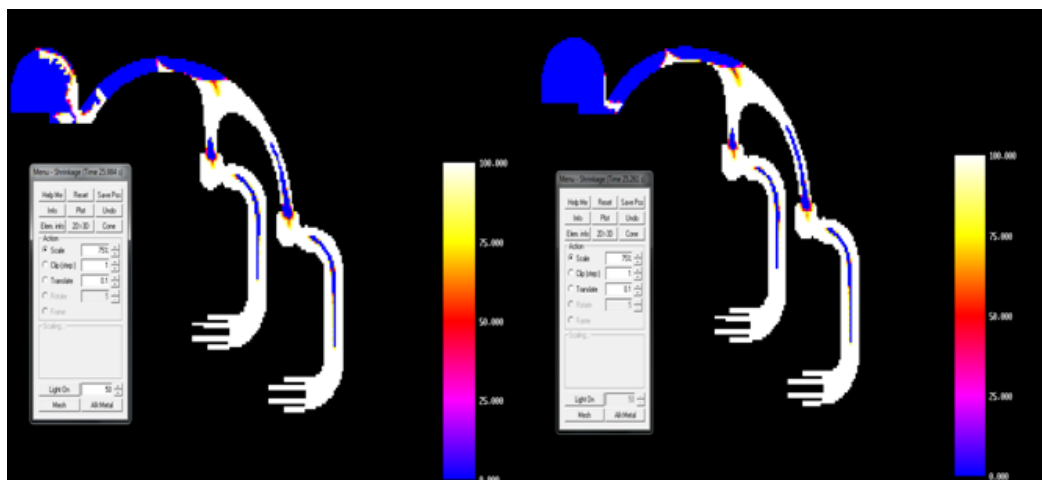


Fig. 91 – Versão E com e sem machos (arrefecedores)

O que se pode observar das simulações efectuadas à versão E, é que com ou sem arrefecedores obtêm-se praticamente os mesmo resultados.

Versão F – Sem machos

Versão F – Com machos a 40 °C

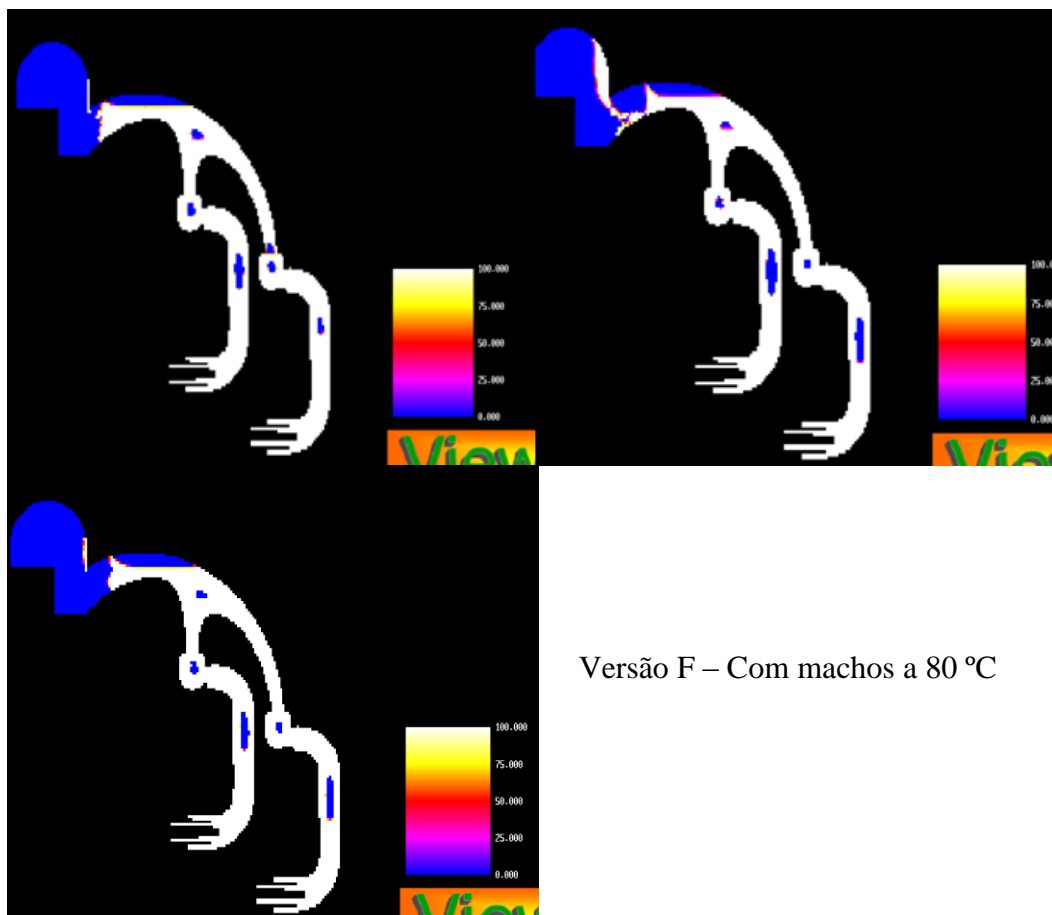


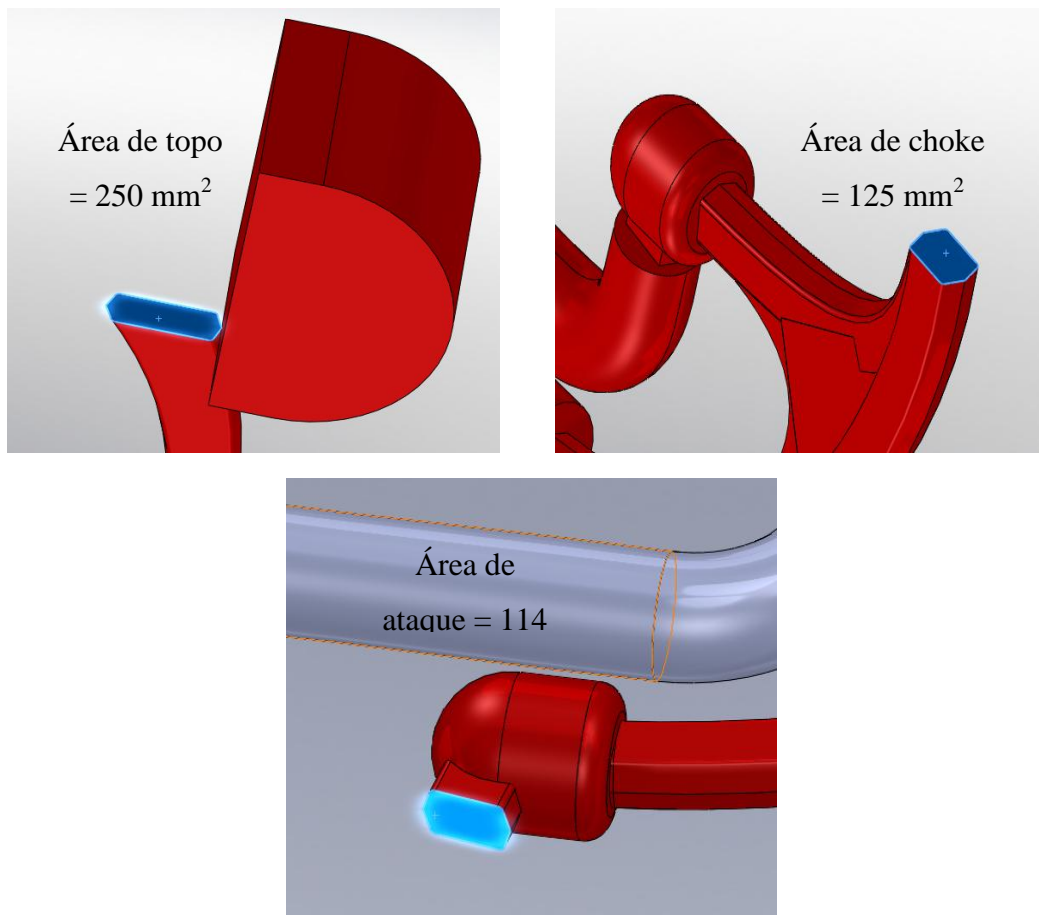
Fig. 92 – Versão F sem machos e com machos a 40 e 80°C

O tempo de solidificação até á temperatura de solidus é idêntico para todas as situações, incluindo com arrefecedores. Relativamente á versão F, a situação mais favorável em termos de defeitos é sem arrefecedores. O programa apresenta outra limitação, que é o da escolha de material para simular o efeito dos machos, o que não garante uma total fiabilidade de resultados.

Após a verificação destes resultados uma decisão foi tomada, e foi a de definir como sistema de gitagem uma geometria baseada numa combinação da versão E e da versão F com ataques hexagonais. Inicialmente a secção de topo da versão F tinha  $350 \text{ mm}^2$  e ia diminuindo até  $175 \text{ mm}^2$ , enquanto que as alterações que foram promovidas foram as de reduzir as secções, enquanto que as secções da versão E tinham  $175 \text{ mm}^2$  e  $90 \text{ mm}^2$  respectivamente. A ultima geometria tem uma secção de topo de  $250 \text{ mm}^2$  e vai diminuindo até aos  $125 \text{ mm}^2$ , a secção de ataque foi agora definida e tem aproximadamente  $114 \text{ mm}^2$ . As razões que levaram a esta mudança foram sendo explicadas após cada simulação.

Características das novas secções:

- Secção de topo:  $250 \text{ mm}^2$
- Secção de choke:  $125 \text{ mm}^2$
- Secção de ataque:  $114 \text{ mm}^2$



**Fig. 93 – Novas secções do sistema de gitagem**

### Modelação da coquilha

Após a determinação do design do sistema de gitagem e das novas secções passou-se à modelação da coquilha.

A forma da bacia foi alterada de forma a promover um vazamento mais tranquilo, visto a modelação anterior provocar turbulência na zona de entrada no gito.

A forma da bacia tem a ver com problemas de velocidade na entrada do gito, bem como com problemas de atravancamento devido ao posicionamento do sistema de machos. A posição descentrada deve-se a isso mesmo, caso contrário seria impossível acoplar o sistema de machos.

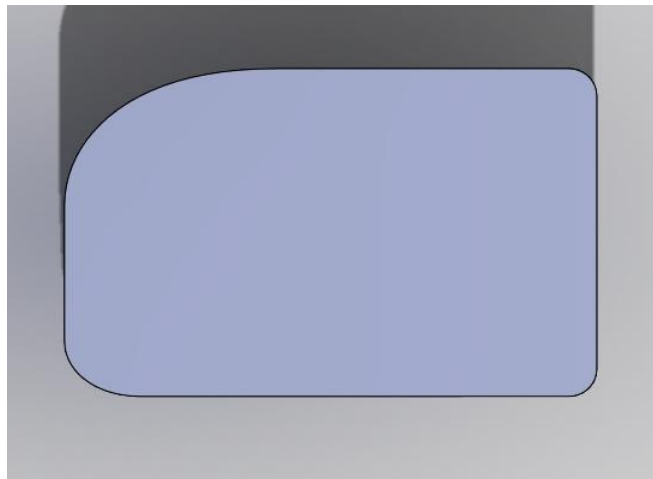


Fig. 94 – Bacia de vazamento

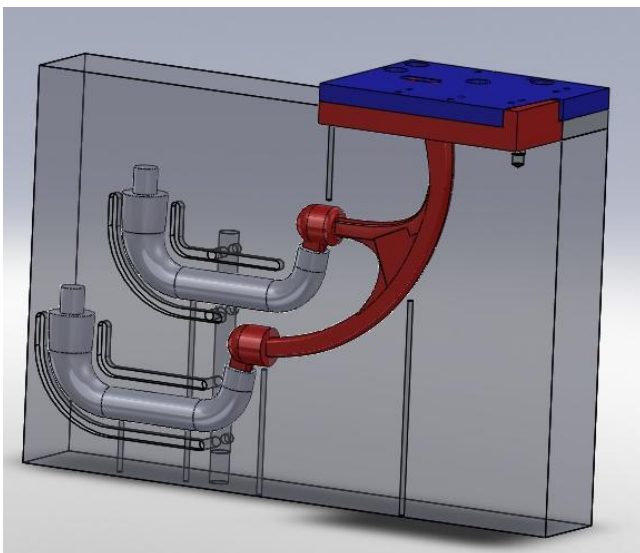
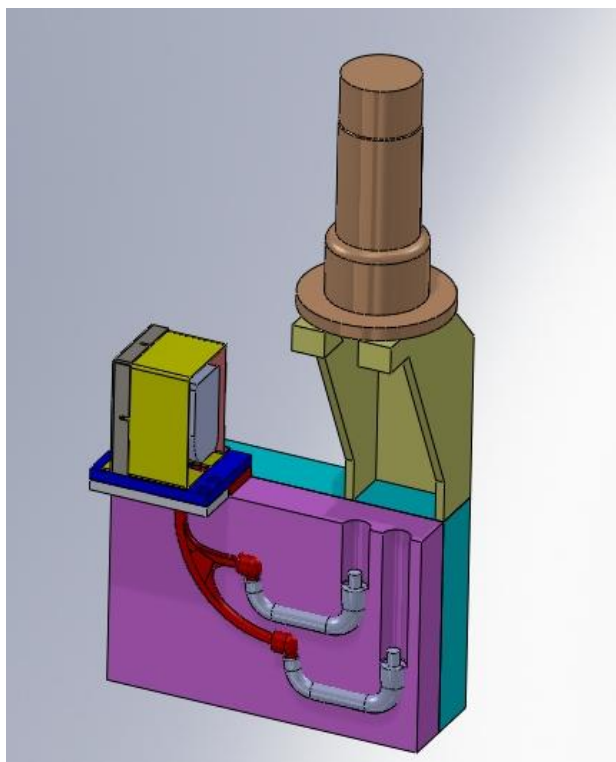


Fig. 95 – Sistema de vácuo e termopares

Nesta figura é possível observar-se o sistema de vácuo implementado, bem como o sistema de termopares que permitirá um controlo gradual da temperatura.



**Fig. 96 – Conjunto parcial da coquilha**

Aqui está representado uma imagem de parte do conjunto total. Como se pode verificar, devido ao tamanho do sistema de machos um ajuste teve que ser feito por forma a conseguir-se acoplar todos os elementos necessários ao bom funcionamento do mesmo.



### 3.1.2 Puxador 822

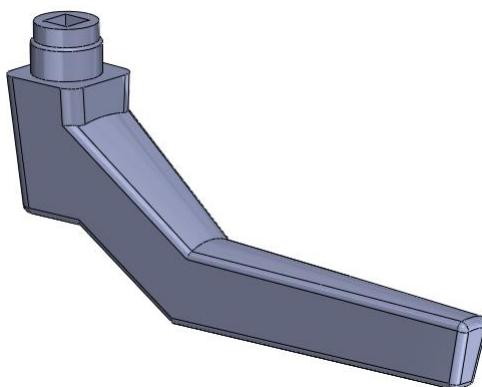


Fig. 97 – CAD do puxador 822

Este puxador foi simulado através de dois processos de vazamento em moldações permanentes. Foi simulado o vazamento por gravidade e em coquilhas rotativas, analisando-se a eventual existência de defeitos e a causa para a existência desses mesmos defeitos. Posteriormente tentou-se simular o revestimento que normalmente é aplicado antes dos vazamentos.

#### Gravidade vs. Coquilha Rotativa

Íncio do enchimento

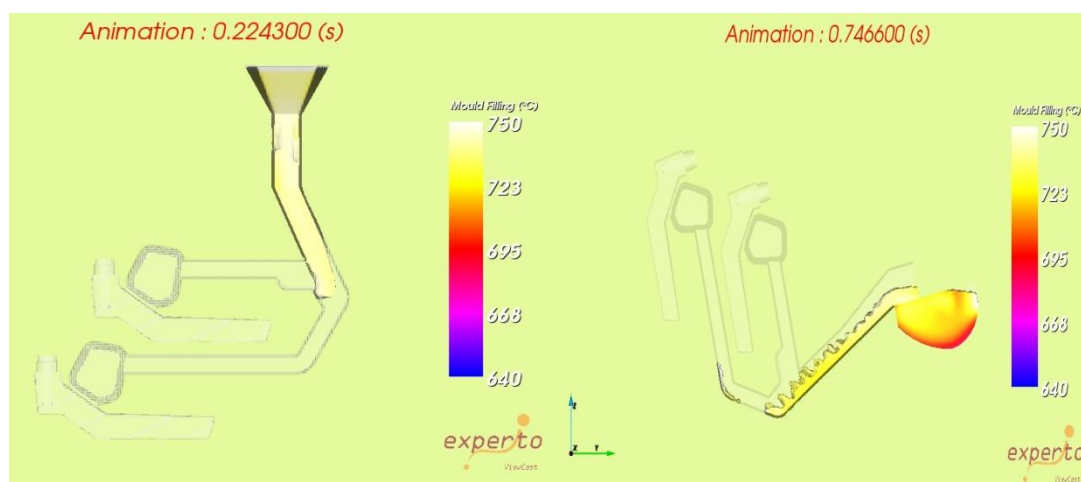
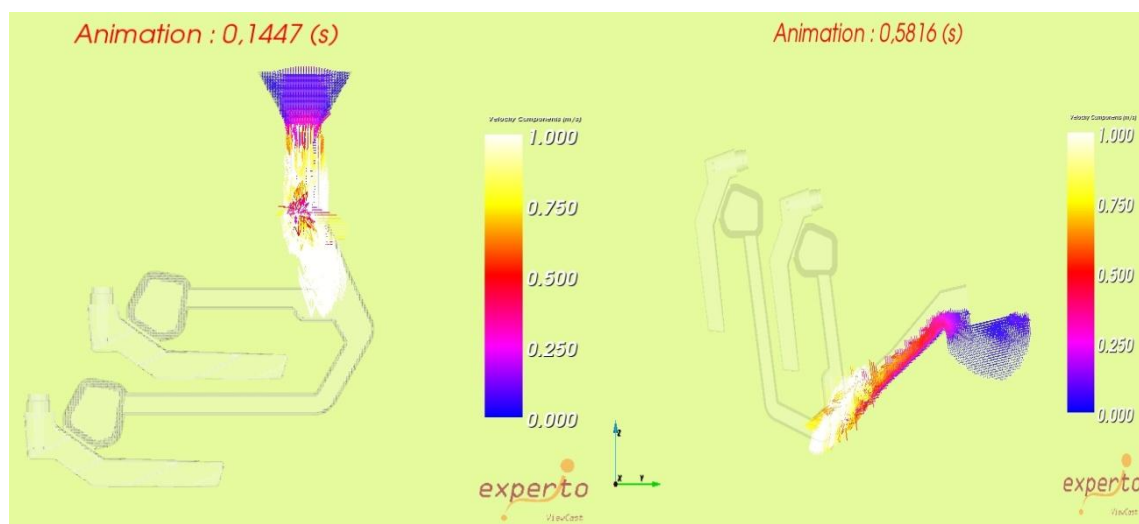
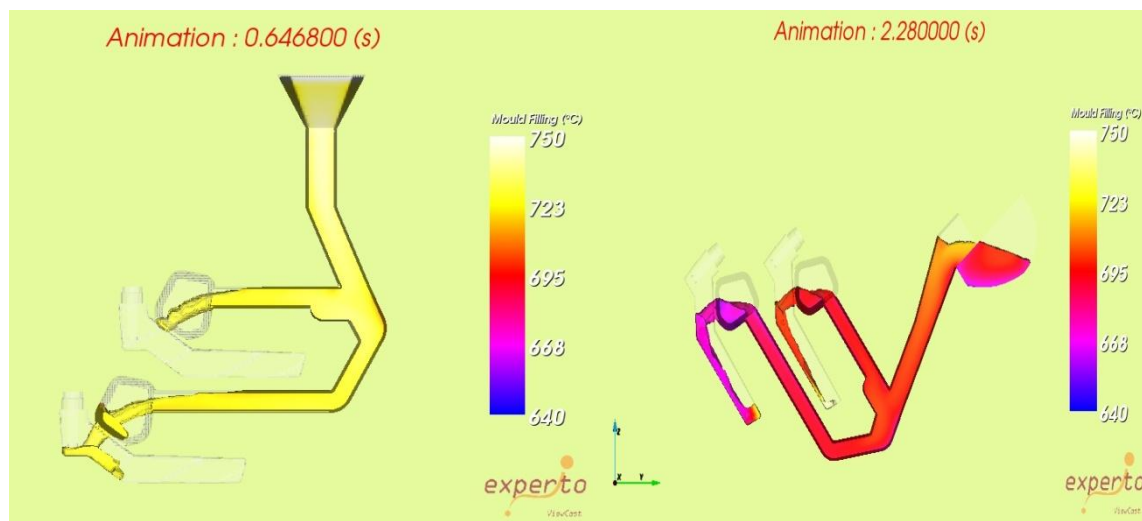


Fig. 98 – Enchimento do modelo 822 por gravidade e rotação (1)

Através desta imagem pode-se verificar o efeito de turbulência que se gera durante o vazamento com rotação.

**Perfis de velocidade:****Fig. 99 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento (1)**

Apesar da constatação anterior podemos verificar, através dos perfis de velocidade, que a velocidade ideal de vazamento (0,5m/s) é ultrapassada nos dois casos, ou seja, a qualidade final das peças está em causa.

**Enchimento:****Fig. 100 – Enchimento do modelo 822 por gravidade e rotação (2)**

Com esta imagem pretende-se mostrar a zona crítica das peças, ou seja, a zona de ataque. No vazamento por gravidade a queda de metal é reduzida, ao contrário do que se passa no vazamento com rotação, em que a queda corresponde á quase total dimensão do manípulo.

### Perfis de velocidade:

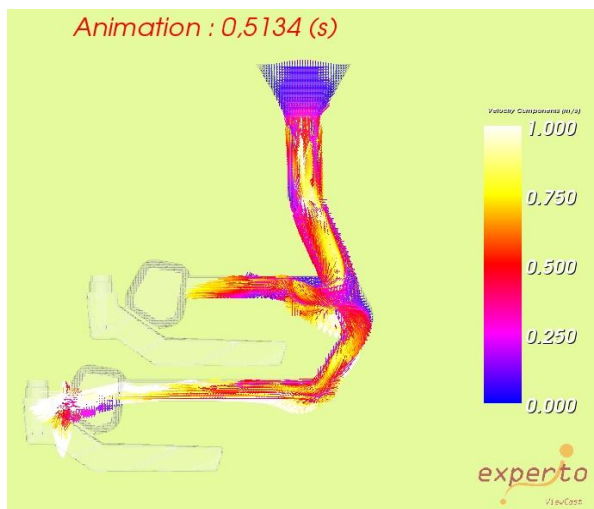


Fig. 101 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento por gravidade

Apesar da queda (para o interior da cavidade do puxador) ser pequena no vazamento por gravidade a velocidade atingida quando o metal entra na cavidade do manípulo é elevada o que poderá levar ao aparecimento de defeitos. Isto está relacionado com a secção do sistema de gitagem e com a secção do sistema de ataque. O ideal seria ter aproximadamente a mesma secção por forma a evitar uma aceleração exagerada do metal.

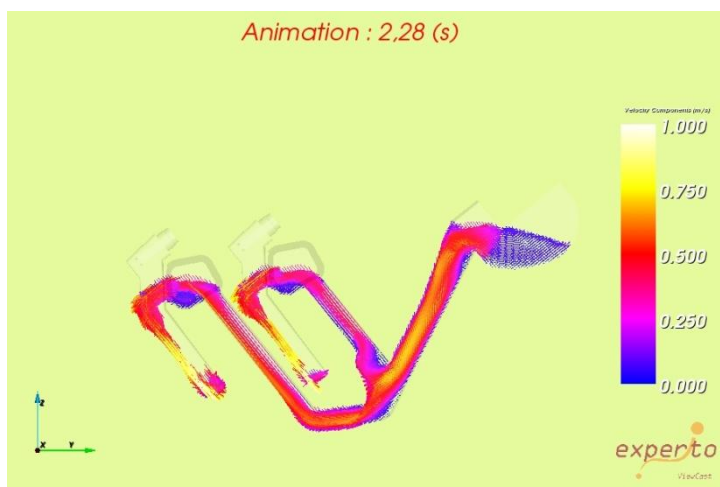


Fig. 102 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento por rotação

Relativamente ao perfil de velocidades gerado no vazamento por rotação pode-se constatar que o valor atingido está acima do ideal (0,5m/s), cerca de 0.75m/s.

### Solidificação:

Após a identificação das possíveis causas que promovem o aparecimento de defeitos passou-se á simulação para verificar se tal corresponde á verdade.

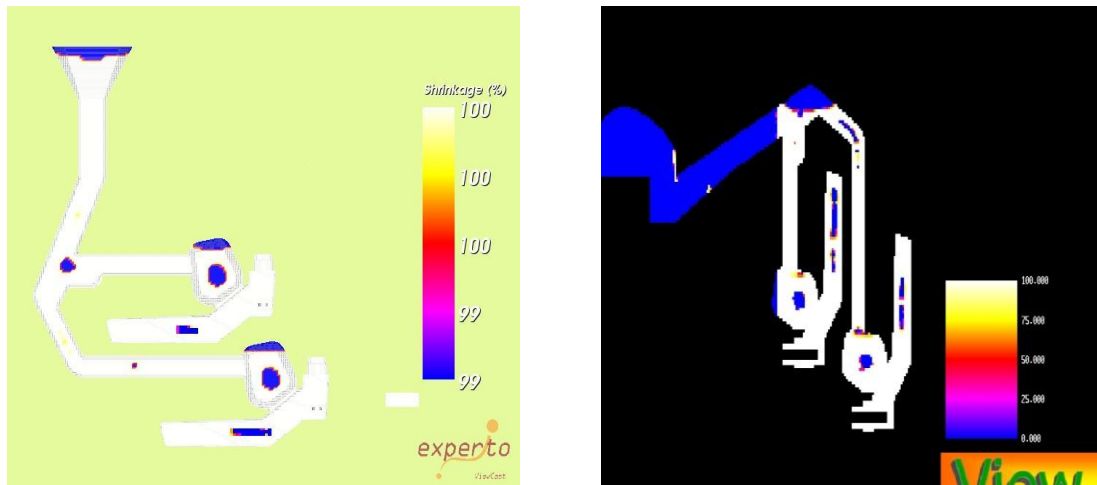


Fig. 103 – Resultado da solidificação

Pode-se observar que os resultados da solidificação correspondem ao esperado, ou seja, o aparecimento de defeitos no interior das cavidades dos puxadores. Existem também defeitos na zona dos alimentadores, mas esses não são prejudiciais ás peças. Mesmo os defeitos existentes no interior das peças podem ser desprezáveis. Isto será verificado no capítulo seguinte.

A justificação para estes resultados pode ser comprovada através da observação da imagem seguinte, que mostra quais foram as últimas zonas da peça a arrefecer.

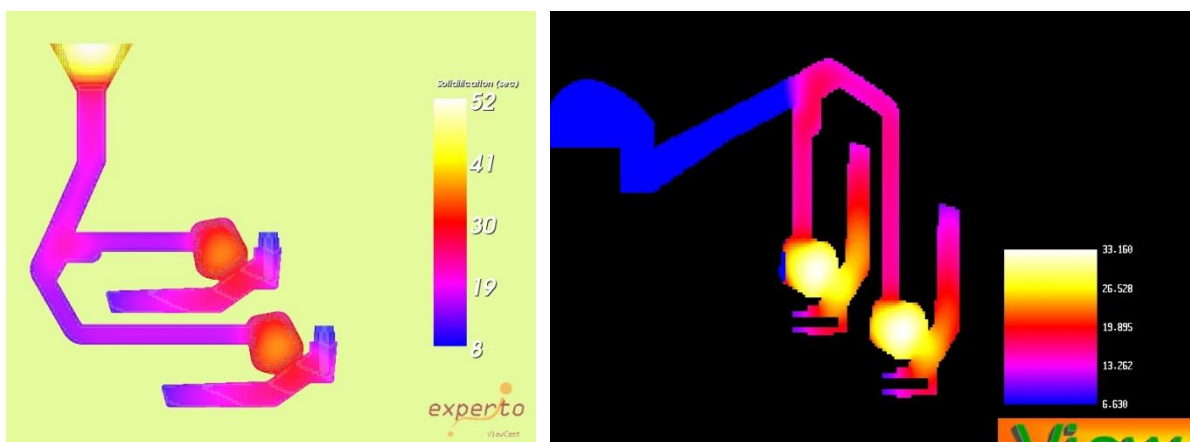


Fig. 104 – Últimas zonas a arrefecer

Após estes resultados tentou-se melhorar a qualidade das peças, foi simulado o efeito do revestimento aplicado antes do vazamento. Isto foi apenas simulado para a versão de rotação, uma vez que para a versão de gravidade o CAD dava problemas na passagem a STL.

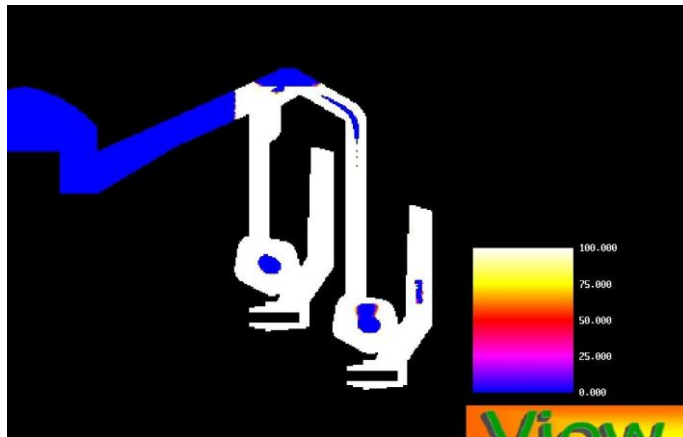


Fig. 105 – Solidificação simulando o efeito do revestimento

A conclusão a que se chegou foi que realmente, e como seria de esperar, o revestimento melhorou a qualidade significativamente. O puxador inferior continua a apresentar alguns defeitos, mas em muito menor escala, enquanto que o puxador superior está completamente livre de defeitos.

Portanto esta última simulação está mais próxima da realidade, mas de qualquer forma só a análise das peças fundidas é que permite verificar a veracidade destes resultados. De notar que o sistema de gitagem deste manipulador não foi adaptado à rotação, portanto teria que ser efectuado um estudo do sistema de gitagem ideal para este manipulador.

### 3.1.3 Puxador 3253

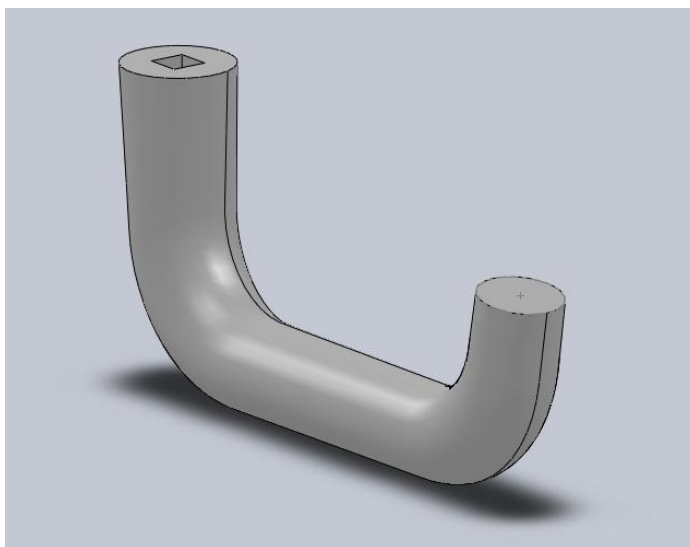


Fig. 106 – CAD do puxador 3

Como aconteceu com o puxador anterior este também foi simulado através de dos mesmos processos de moldações permanentes.

#### Enchimento:

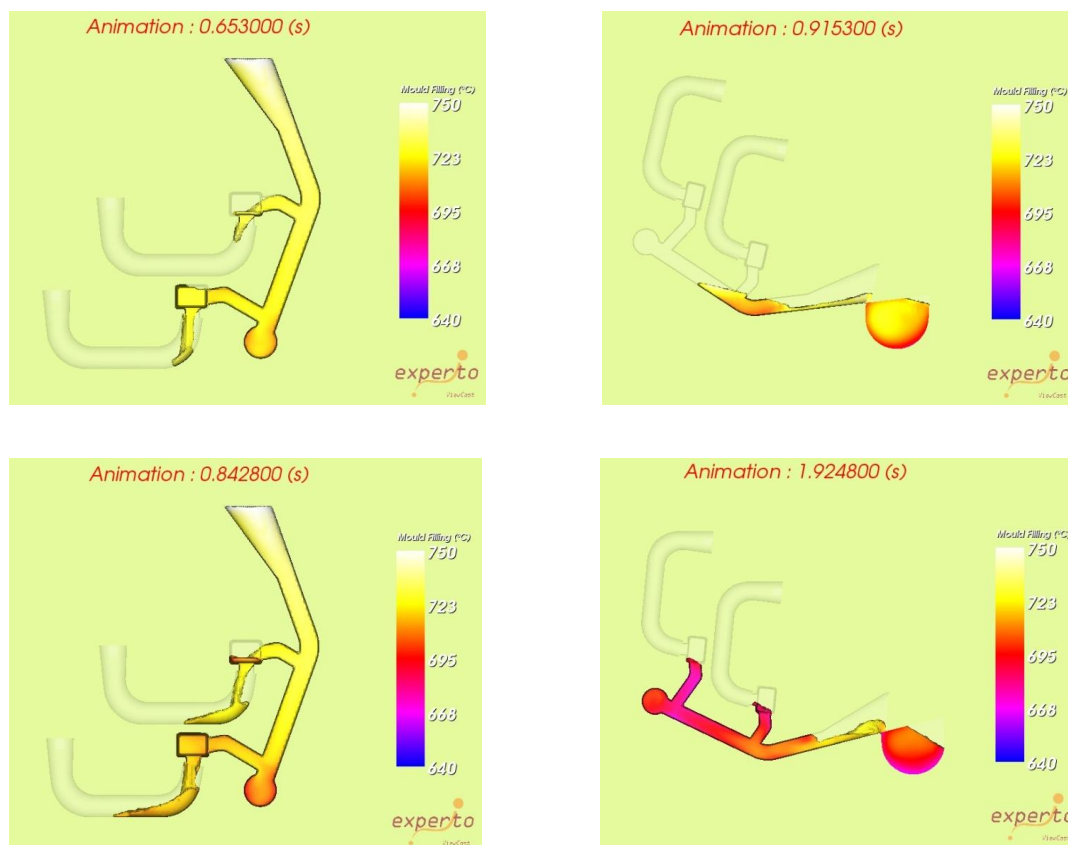


Fig. 107 – Análise do enchimento por gravidade e rotação

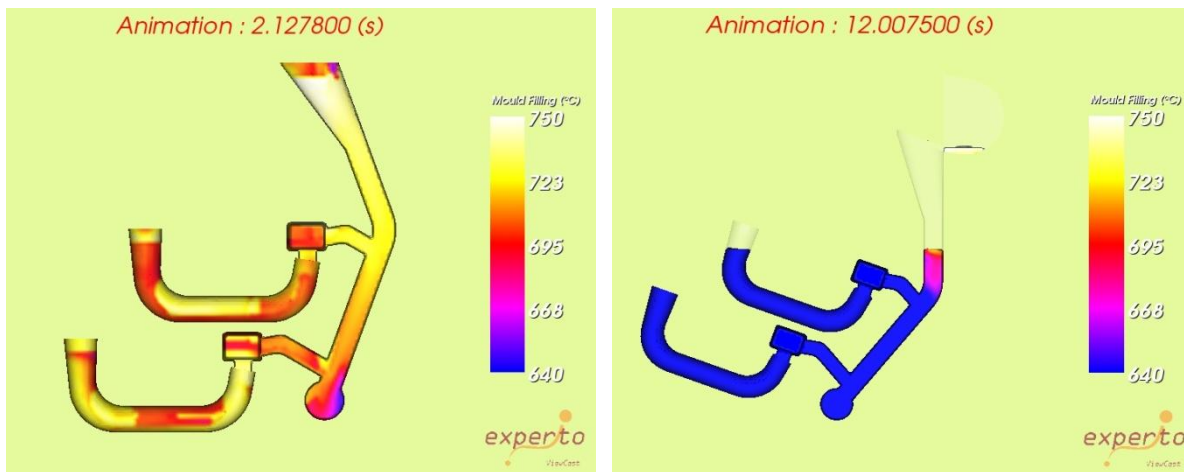


Fig. 108 – Análise do enchimento, posição final

O programa apresenta uma limitação, uma vez que só permite uma rotação de 90°, ou seja, não foi possível levar a simulação de enchimento até ao fim, com os puxadores na horizontal.

Pode-se observar que no enchimento por gravidade o metal tem uma queda razoável quando entra na cavidade dos puxadores, enquanto que no enchimento por rotação a entrada no metal no interior da peça é feita sem queda, que se denomina como enchimento em nascente.

### Perfis de velocidade

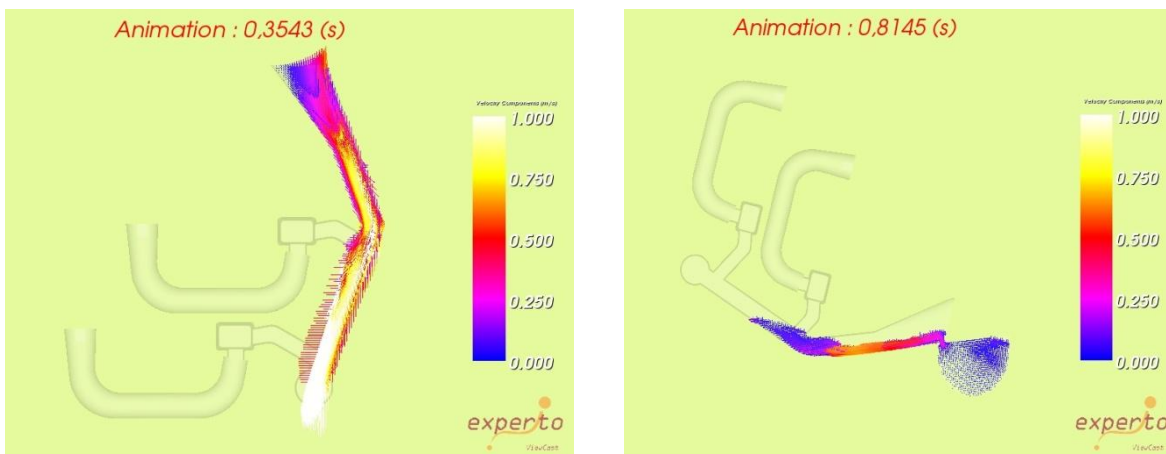


Fig. 109 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento (1)

Como se verifica o perfil de velocidades gerado é muito superior no enchimento por gravidade do que no enchimento por rotação, isto obviamente a ver com a maneira como o metal entra no sistema de gitagem.



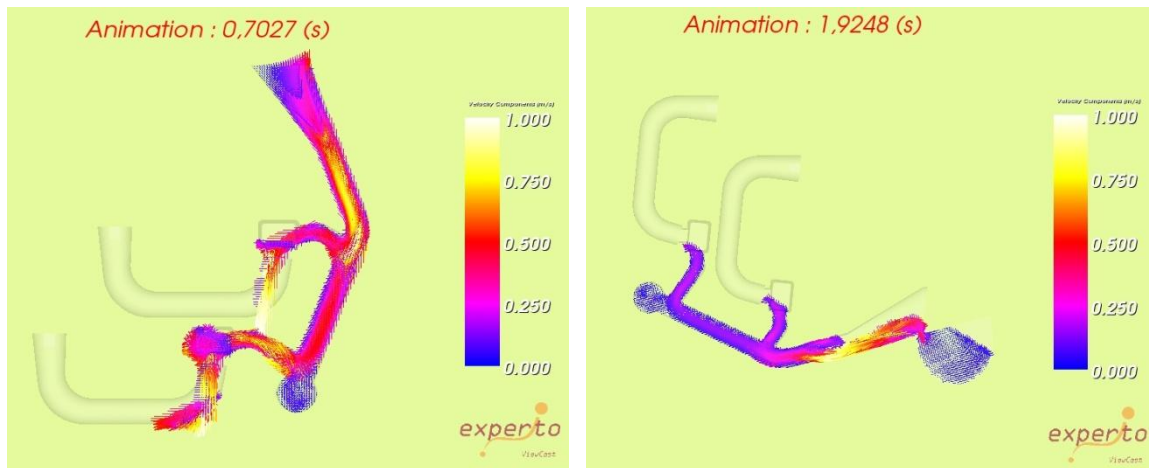


Fig. 110 – Perfil de velocidades gerado durante o vazamento (2)

Mais uma vez se verifica que a entrada do metal na cavidade dos puxadores é feita de forma tranquila no caso do enchimento por rotação, o mesmo não acontecendo no enchimento por gravidade.

Dados os resultados, pensa-se que no enchimento por gravidade apareçam mais defeitos que no enchimento por rotação, de acordo com o concluído anteriormente.

### Solidificação:

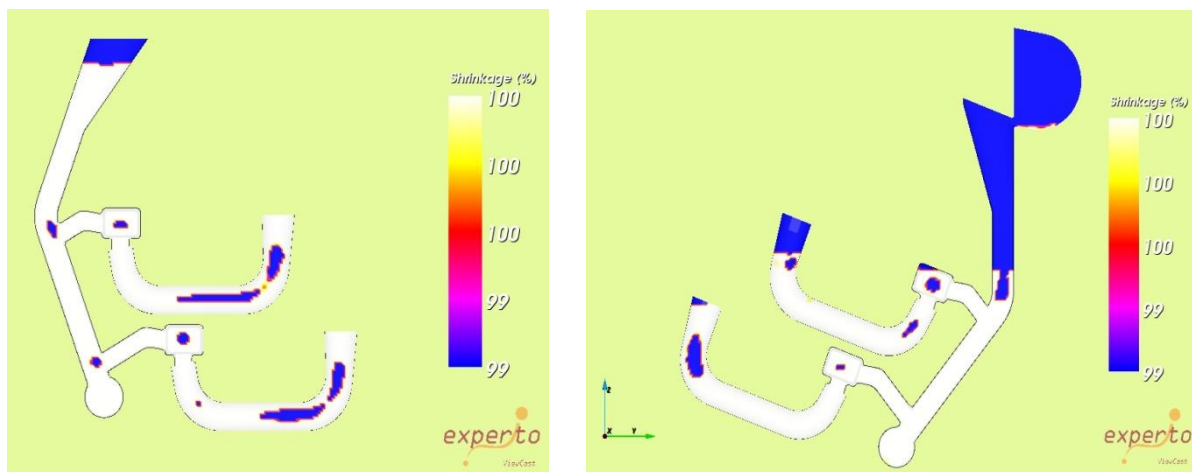


Fig. 111 – Solidificação no fim do processo de enchimento

Apesar da limitação do programa podemos concluir que o enchimento em nascente favorece consideravelmente a qualidade final das peças, enquanto que no enchimento por gravidade tal já não acontece. Estes defeitos estão relacionados com as velocidades geradas, bem como com o perfil do sistema de gitagem, que por ter secções rectas favorece o aumento de velocidade.



O esperado é que os puxadores obtidos por gravidade apresentem defeitos consideravelmente mais e maiores defeitos que no enchimento por coquilha rotativa. Para tal foram obtidos os puxadores na liga AG4Z e foi feito o estudo que permite comparar os dois tipos de processo, os resultados são apresentados no capítulo seguinte.

## **3.2 Caracterização das Peças Obtidas – Manípulo 3253**

### **3.2.1 Inspeção Visual (STA)**

A STA vazou 191 cachos (382 peças) através do processo de coquilha rotativa – cerca de 1 dia de trabalho (8,5h) e obteve as seguintes rejeições:

Peças rejeitadas limagem - 1

Peças rejeitadas na 1ª. esmerilagem - 22

Peças rejeitadas na 2ª. esmerilagem - 2

Peças rejeitadas na anodização - 2

Total peças rejeitadas - 27

% peças rejeitadas - 6.6

O tipo de defeitos predominantes são bolhas de ar.

Relativamente ao processo de vazamento por gravidade os únicos dados disponibilizados foram a percentagem final de peças rejeitadas e o número total de peças, 4,3% 3 382 respectivamente.

Obviamente seria necessário conhecer mais condições de teste, como a velocidade de rotação, tempo de solidificação, etc. Seria interessante saber se durante a rotação a velocidade foi sendo ajustada consoante as necessidades.

### 3.2.2 Amostragem Metalográfica

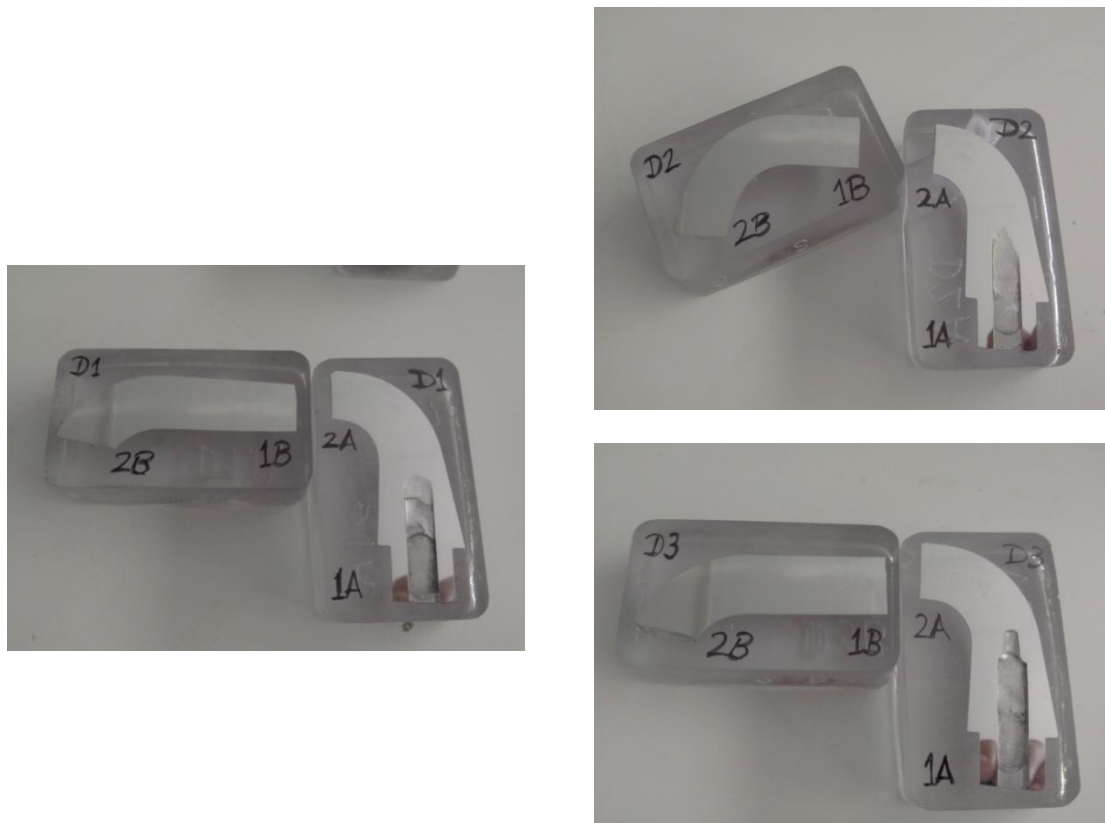
Foram cedidas 6 amostras, 3 obtidas por gravidade e 3 por coquilha rotativa. Objectivo foi analisar as microestruturas e verificar se os resultados obtidos nas simulações correspondiam á realidade. Assumiu-se que as propriedades e condições de fundição eram aproximadamente iguais ao simulado.

As peças foram identificadas como amostras F, obtidas em vazamento por gravidade e amostras D, obtidas por coquilha rotativa. Dentro de cada amostra procurou-se identificar 2 zonas distintas, as zonas A e zonas B, que correspondem respectivamente á zona do macho e á zona de trabalho. Dentro dessas zonas procedeu-se a mais uma separação, sendo identificadas como zona 1A/2A e 1B/2B .

#### Amostras F:



Fig. 112 – Amostras F1, F2 e F3

**Amostras D:****Fig. 113 – Amostras D1, D2 e D3**

As amostras foram identificadas, bem como as outras zonas referidas anteriormente. Após a identificação das amostras procedeu-se á análise de defeitos existentes nas peças, para tal foi feita uma tabela por forma a se perceber quais as zonas críticas das peças.

Legenda:

MR – Microrechupe      BH – Bolhas de hidrogénio

E – Elevado

R – Rechupe

FO – Filmes de óxidos

M – Médio

BA – Bolhas de ar

B – Baixo

N – Nulo

**Tabela 19 – Defeitos encontrados na amostra F1**

Amostra F1																				
Zona	1A					2A					1B					2B				
Defeitos	M		B	B	F	M		B	B	F	M		B	B	F	M		B	B	F
Zona	R	R	A	H	O	R	R	A	H	O	R	R	A	H	O	R	R	A	H	O
Cima	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Baixo	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Meio	N	N	N	N	N	M	N	M	N	N	B	N	B	N	N	M	N	B	N	N

Tabela 20 – Defeitos encontrados na amostra F2

Amostra F2																				
Zona	1A					2A					1B					2B				
Defeitos	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F
Zona	R		A	H	O	R		A	H	O	R		A	H	O	R		A	H	O
Cima	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Baixo	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Meio	B	N	B	N	N	B	N	B	N	N	N	N	B	N	N	N	N	B	N	N

Tabela 21 – Defeitos encontrados na amostra F3

Amostra F3																				
Zona	1A					2A					1B					2B				
Defeitos	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F
Zona	R		A	H	O	R		A	H	O	R		A	H	O	R		A	H	O
Cima	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Baixo	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Meio	B	N	M	N	N	B	N	M	N	N	E	N	M	N	N	E	N	M	N	N

Tabela 22 – Defeitos encontrados na amostra D1

Amostra D1																				
Zona	1A					2A					1B					2B				
Defeitos	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F
Zona	R		A	H	O	R		A	H	O	R		A	H	O	R		A	H	O
Cima	N	N	E	N	N	E	N	N	N	N	M	N	M	N	N	M	N	M	N	N
Baixo	M	N	E	N	N	B	N	N	N	N	M	N	B	N	N	M	N	N	N	N
Meio	N	N	N	N	N	M	N	E	N	N	E	B	E	N	N	E	B	E	N	N

Tabela 23 – Defeitos encontrados na amostra D2

Amostra D2																				
Zona	1A					2A					1B					2B				
Defeitos	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F	M	R	B	B	F
Zona	R		A	H	O	R		A	H	O	R		A	H	O	R		A	H	O
Cima	B	N	B	N	N	N	N	N	N	N	B	N	B	N	N	B	N	B	N	N
Baixo	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	B	N	B	N	N	B	N	B	N	N
Meio	N	N	N	N	N	B	N	B	N	B	M	N	M	N	M	M	N	N	N	M

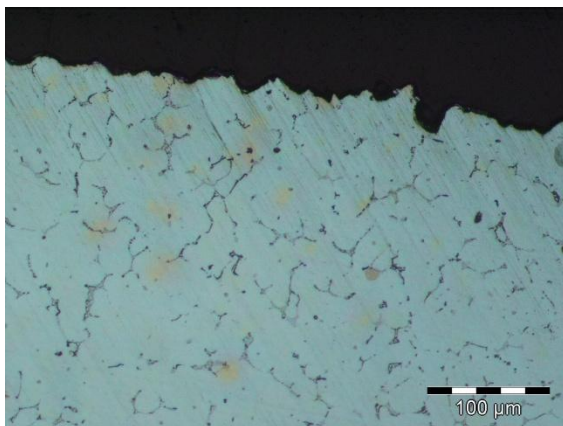
Tabela 24 – Defeitos encontrados na amostra D3

Amostra D3																				
Zona	1A					2A					1B					2B				
Defeitos	M		B	B	F	M		B	B	F	M		B	B	F	M		B	B	F
Zona	R	R	A	H	O	R	R	A	H	O	R	R	A	H	O	R	R	A	H	O
Cima	B	N	B	N	N	M	N	B	N	N	M	N	B	N	N	M	N	B	N	N
Baixo	B	N	N	N	N	M	N	B	N	N	M	N	M	N	N	M	N	M	N	N
Meio	M	N	M	N	N	M	N	M	N	N	E	M	E	N	N	E	M	E	N	N

Após a análise da microestrutura de cada amostra foram retiradas algumas imagens da por forma a justificar os resultados expressos nas tabelas.

### Amostra F1

F1 A – 300X



F1 B – 300X

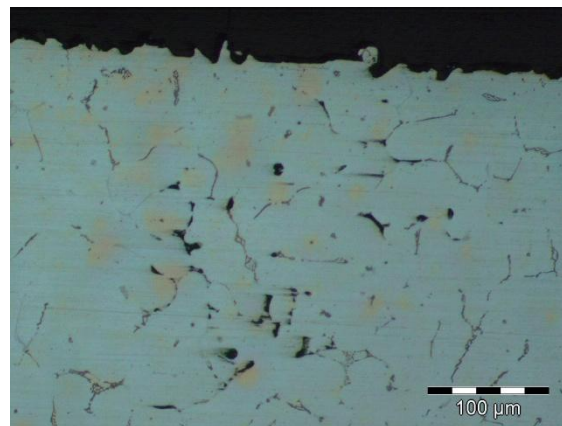
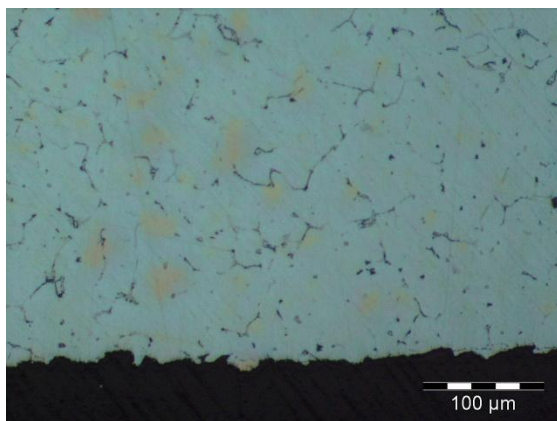


Fig. 114 – Metalografia da amostra F1, zona A e B: Cima

F1 A – 300X



F1 B – 300X

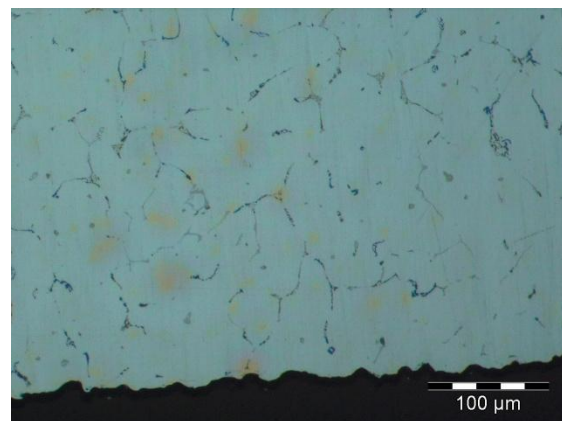
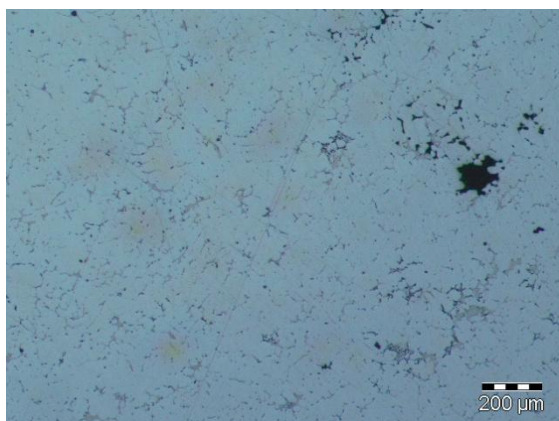


Fig. 115 – Metalografia da amostra F1, zona A e B: Baixo

F1 A – 300X



F1 B – 150X

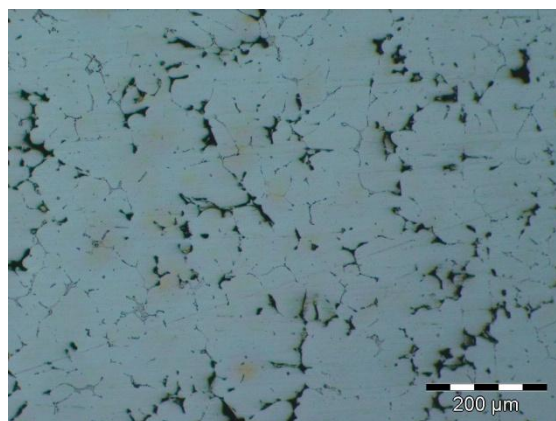
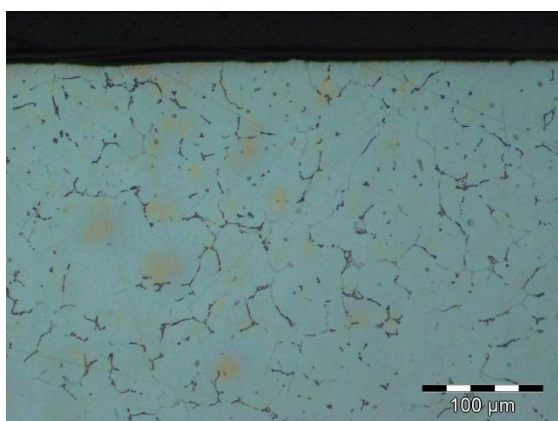


Fig. 116 – Metalografia da amostra F1, zona A e B: Meio

## Amostra F2

F2 A – 300X



F2 B – 300X

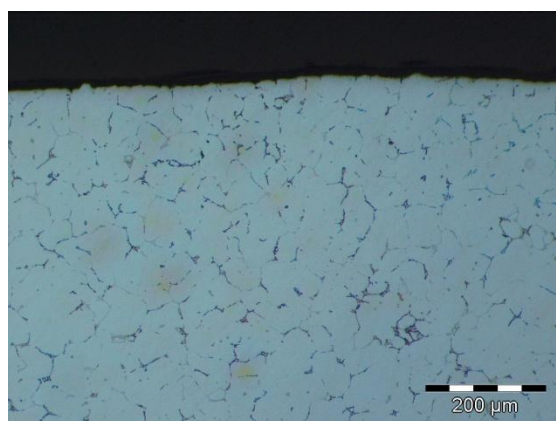
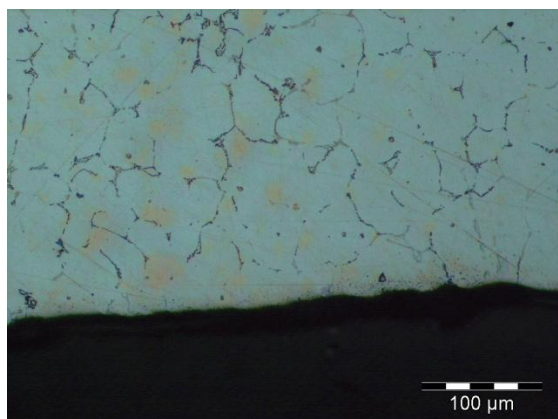


Fig. 117 – Metalografia da amostra F2, zona A e B: Cima

F2 B – 300X



F2 A – 300X

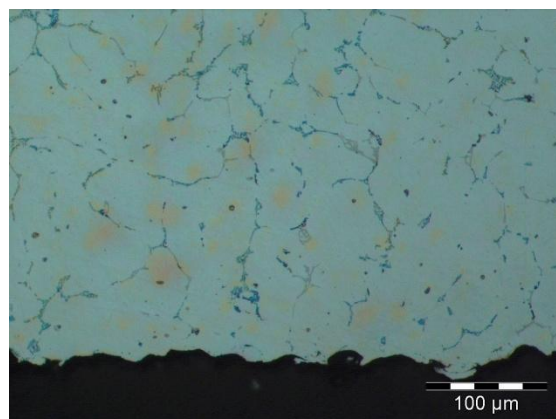


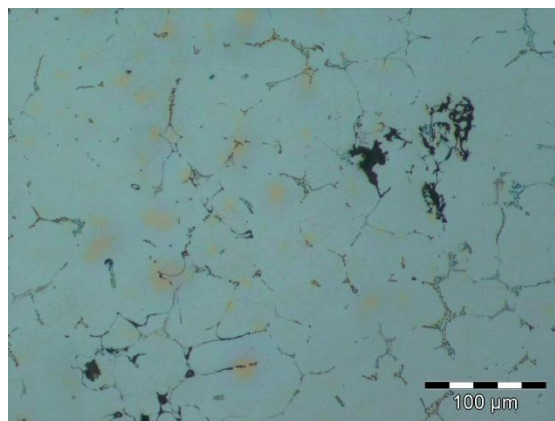
Fig. 118 – Metalografia da amostra F2, zona A e B: Baixo



F2 A – 150X



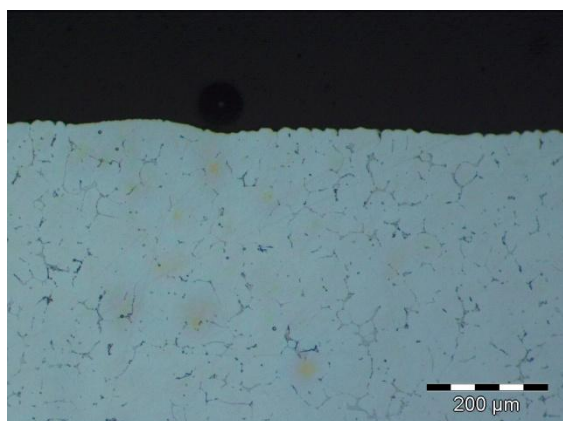
F2 B – 300X



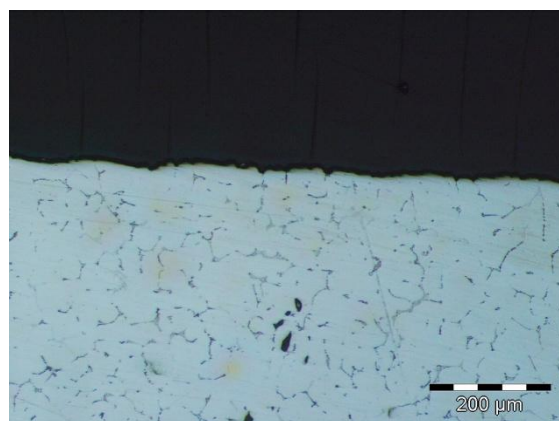
**Fig. 119 – Metalografia da amostra F2, zona A e B: Meio**

### **Amostra F3**

F3 A – 150X

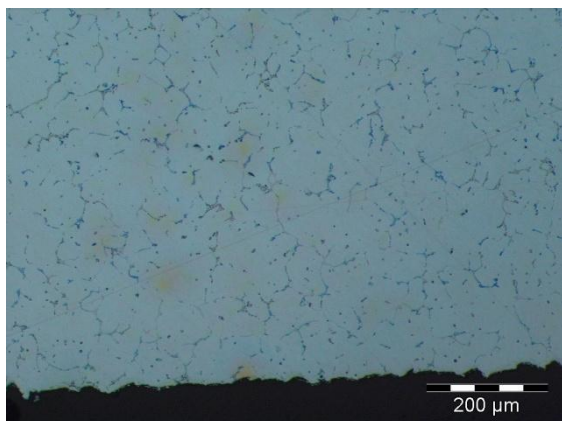


F3 B – 150X

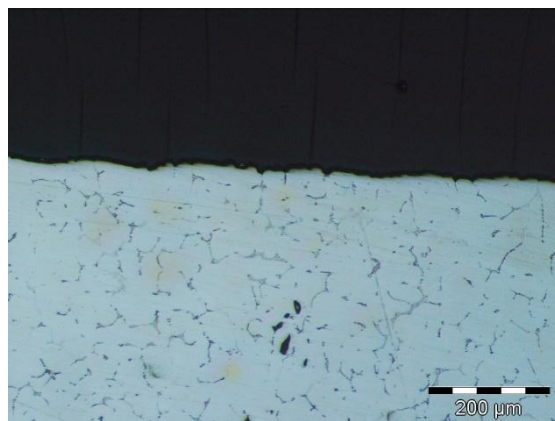


**Fig. 120 - Metalografia da amostra F3, zona A e B: Cima**

F3 A – 150X

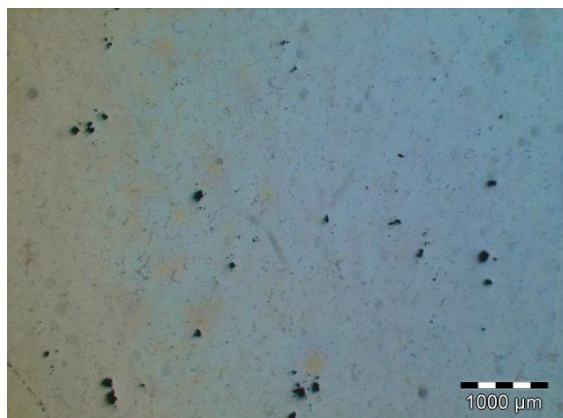


F3 B – 150X



**Fig. 121 – Metalografia da amostra F3, zona A e B: Baixo**

F3 A – 23X



F3 B – 23X

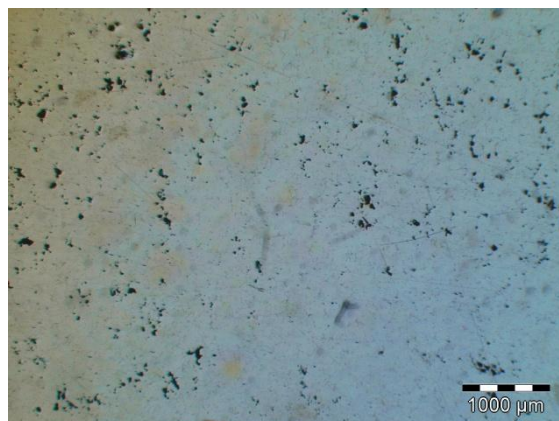


Fig. 122 – Metalografia da amostra F3, zona A e B: Meio

### Amostra D1

D1 A – 150X

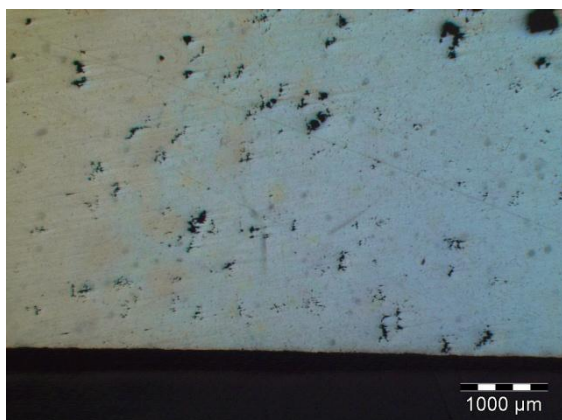


D1 B – 23X



Fig. 123 – Metalografia da amostra D1, zona A e B: Cima

D1 A – 23X



D1 B – 150X

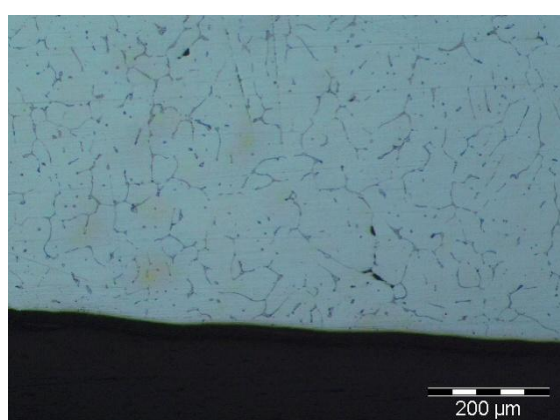
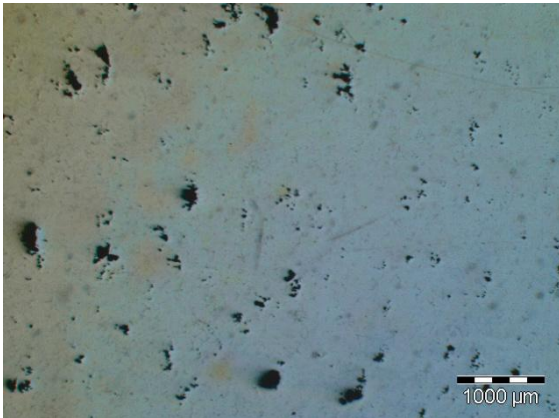


Fig. 124 – Metalografia da amostra D1, zona A e B: Baixo



D1 A – 150X



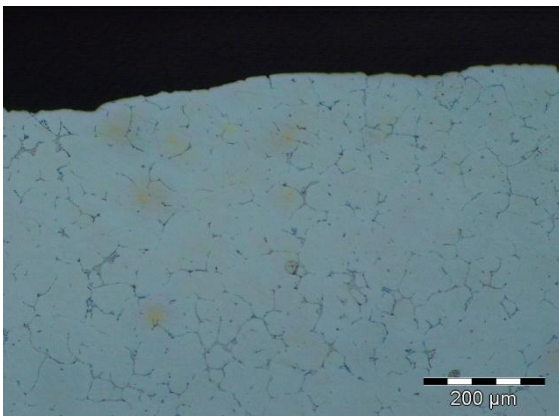
D1 B – 23X



Fig. 125 – Metalografia da amostra D1, zona A e B: Meio

### Amostra D2

D2 A – 150X



D2 B – 150X

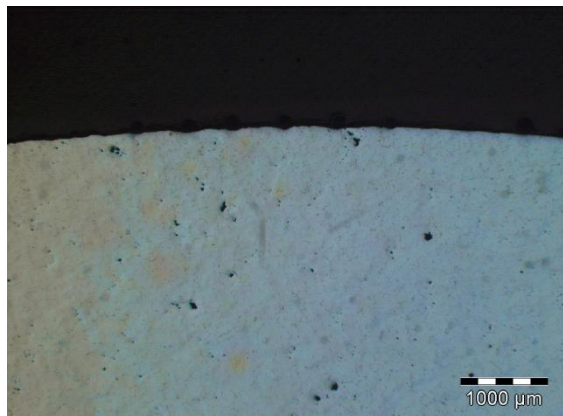
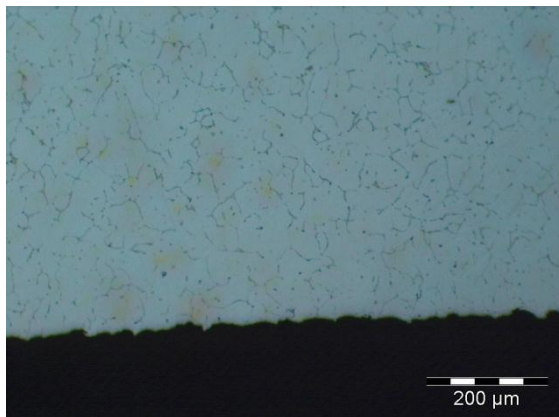


Fig. 126 – Metalografia da amostra D2, zona A e B: Cima

D2 A – 150X



D2 B – 150X

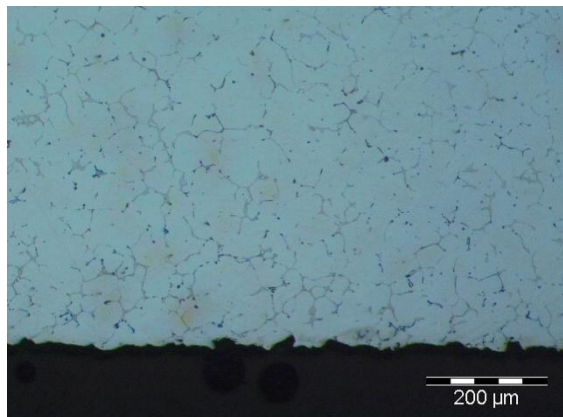
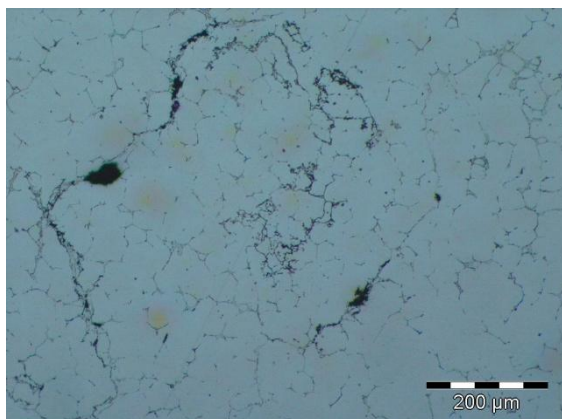


Fig. 127 – Metalografia da amostra D2, zona A e B: Baixo

D2 A – 150X



D2 B – 75X

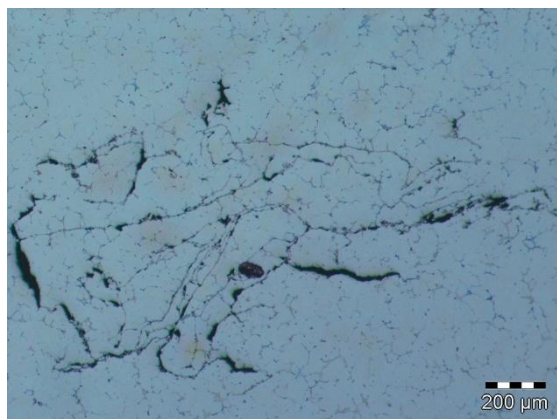


Fig. 128 – Metalografia da amostra D2, zona A e B: Meio

### Amostra D3

D3 A – 75X



D3 B – 75X

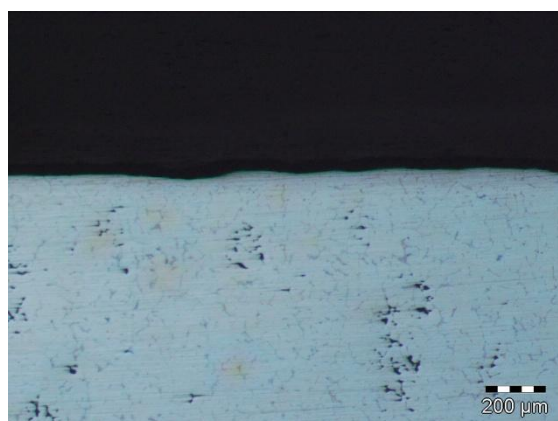
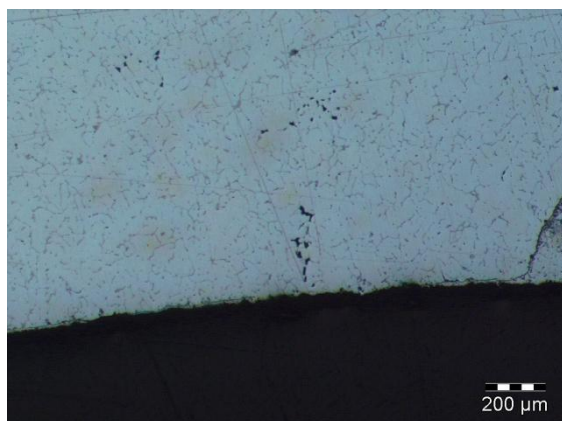


Fig. 129 – Metalografia da amostra D3, zona A e B: Cima

D3 A – 75X



D3 B – 23X

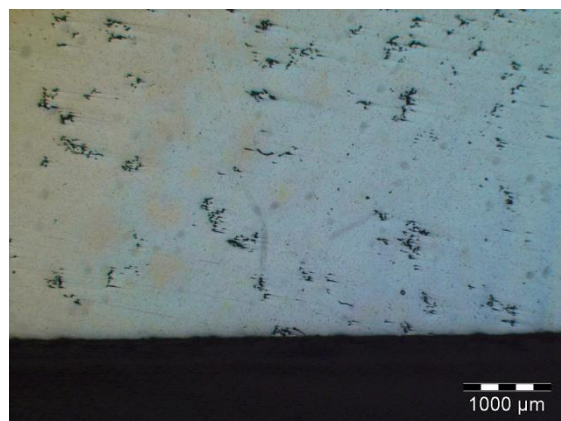


Fig. 130 – Metalografia da amostra D3, zona A e B: Baixo

D3 A – 23X



D3 B – 23X



**Fig. 131 – Metalografia da amostra D3, zona A e B: Meio**

Como se pode concluir através das tabelas e das micrografias tiradas às amostras, na realidade as peças obtidas por gravidade estão em melhores condições que as obtidas por rotação. Mas tal é inconclusivo relativamente à viabilidade dos processos, visto que uma amostra de 3 peças de cada processo é insignificante para afirmar que um ou outro processo é o indicado para produzir este puxador, além do mais o sistema de gitagem não estava adaptado para a rotação.



## 4 Conclusão e Sugestão de Trabalhos Futuros

### 4.1 Conclusão

A simulação ainda está longe de garantir uma eficácia de resultados a 100%, mas de qualquer forma já nos dá uma ideia do que podemos vir a obter. Para algumas peças torna-se óbvio, sem necessitar de simular, que tipo de problemas poderemos vir a encontrar, mas para outras torna-se complicado “adivinhar”. É uma arma bastante forte que temos do nosso lado e que com algumas afinações nos levará a conclusões cada vez mais próximas da realidade. O programa que foi utilizado durante a realização dos ensaios, o *Experto*, relativamente ao processo de vazamento por gravidade obtém uns resultados bastante próximos da realidade, mas quanto ao processo de vazamento em coquilha rotativa ainda necessita de algumas correcções, como por exemplo, o delay que se verifica entre a rotação da peça e a rotação do metal líquido no seu interior. Terá que ser desenvolvida também uma forma de permitir que as peças rodem mais do que 90°, bem como a possibilidade de alterar a velocidade de rotação durante o processo de vazamento, visto essa ser uma das maiores armas deste processo. O processo de vazamento em coquilha rotativa pode ir até aos 360° de rotação.

Relativamente ao processo de vazamento por coquilha rotativa, e através dos resultados experimentais anteriormente obtidos pode-se concluir que se trata de um processo bastante interessante, apesar de não poder ser aplicado a todo o tipos de peças, visto reduzir e em alguns casos eliminar por completo as quedas de metal no interior da moldação, que são uma das principais causas de defeitos nas peças.

## 4.2 Trabalhos Futuros

Devido às características e potencialidades deste processo seria interessante realizar um estudo que envolvesse velocidade de vazamento variável, bem como uma melhor identificação das peças, ou seja, se cada cacho tem duas peças seria interessante saber dividir as amostras em puxadores superiores e inferiores. Isto porque devido às dimensões dos moldes serem reduzidas as peças obtidas são fundidas muito próximas uma da outra e o calor transmitido pode afectar as características de uma ou de outra peça.

Seria vantajoso também realizar um estudo á volta dos programas de simulação, experimentando e comparando dois programas diferentes.

Relativamente à validação experimental do projecto da coquilha, é fundamental que isso se verifique por forma a se proceder a novos testes de validação das peças obtidas nessa mesma coquilha.

## 5 Bibliografia

- (s.d.). Obtido em Outubro de 2009, de Wikipedia.org: <http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminum>
- Alonso, O. S. (1972). *Tratado Prático de Moldeo y Fundición*. Editorial.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. (1999). *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. Butterworth Heinmann.
- Ashby, M., Shercliff, H., & Cebon, D. (2007). *Engineering Materials 1: Engineering, Science, Processing and Design*. Butterworth-Heinmann.
- BCS Incorporated. (Novembro 2005). *Advanced Melting Technologies: Energie Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry*.
- Beely, P. (2001). *Foundry Technology*. Butterworth-Heinmann.
- Brown, J. R. (2000). *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. Butterworth-Heinmann.
- Brown, J. R. (2000). *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. Butterworth-Heinmann.
- Campbell, J. (2003). *Castings*. Butterworth-Heinmann.
- Campbell, J. (2004). *Castings Practice: The 10 Rules of Castings*. Elsevier.
- Cramer, S. D. (2003). *ASM Handbook, Volume 13, Part 2* (Vol. 13). ASM Internacional.
- DTM / E. Thiberge. (2006). *Aluminum in Shipbuilding*.
- Dwight, J. (1999). *Aluminium Design and Construction*. E & FN SPON.
- Experto 2010
- Ferreira, J. M. (1999). *Tecnologia da Fundição*. Fundação Calouste de Gulbenkian.
- Foseco. (2008). *Dycote Manual*. Germany.
- Gonçalves, N. D. (2007). *Método dos Volumes Finitos em Malhas não Estruturadas*. Porto.
- Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes* (Vol. 1). (2003). Marcel Dekker, INC.
- Heine, R. W., Loper, C. R., & Rosenthal, P. C. (1967). *Principles of Metal Casting*. McGraw-Hill.
- Hoffman, D. F., Singh, B., & III, J. H. (1998). *Handbook of Vacuum Science and Technology*. Elsevier.
- Magalhães, A. B. (1989). *Fundição em Coquilha*.
- Magalhães, A. B. (2003). *Processo Durville*. Investigação INEGI.

- Magalhães, A. B., Neto, R., Reis, A., & Duarte, T. (2002/2003). *Tecnologia da Fundição*. DEMEGI.
- Mesquita, A. P. (1971). *Tecnologia da Fundição de Ligas de Alumínio*. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Industrial.
- Mondolfo, L. F. (1967). *Manganese in Aluminum Alloys*. The Manganese Centre.
- Muskegon, G. N., Whitehall, L. L., & Johnson, R. F. (1994). *Patente N.º 5,287,910*. Estados Unidos da América.
- Society, T. A. *Aluminum Casting Technology*. The American's Foundrymen's Society.
- Torres, J. (2000). *Manual Prático de Fundição e Elementos de Prevenção da Corr.* Hemus.
- Wessel, J. K., & Associates. (2004). *Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs*. John Wiley & Sons, INC.
- William D. Callister, J. (2001). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- Yu, K.-O. (2002). *Modeling for Casting and Solidification*. American's Foundrymen's Society.
- Zhang, C., Mucciardi, F., & Gruzleski, J. (2006). *Thermal Management of Permanent Molds for the Casting of Aluminum Alloys*. Dept. of Mining, Metals and Materials Engineering McGill University.
- Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A., & Glazoff, M. V. (2007). *Casting Aluminum Alloys*. Moscovo: Elsevier.